



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**PRODUÇÃO E ANÁLISE DA CINZA DA FOLHA DE BAMBU COMO
UM POTENCIAL MATERIAL POZOLÂNICO PARA FINS
GEOTÉCNICOS**

Isabelli Menegat

Lajeado, julho de 2020.

Isabelli Menegat

**PRODUÇÃO E ANÁLISE DA CINZA DA FOLHA DE BAMBU COMO
UM POTENCIAL MATERIAL POZOLÂNICO PARA FINS
GEOTÉCNICOS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof^ª. Ma. Helena Batista Leon

Lajeado, julho de 2020.

Isabelli Menegat

**PRODUÇÃO E ANÁLISE DA CINZA DA FOLHA DE BAMBU COMO
UM POTENCIAL MATERIAL POZOLÂNICO PARA FINS
GEOTÉCNICOS**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profa. Ma. Helena Batista Leon – orientadora
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Ma. Mariana da Silva Carretta
Universidade Federal do Rio Grande do Sul -
UFRGS

Prof. Me. Deividi Maurenre Gomes da Silva
Universidade Federal do Rio Grande do Sul -
UFRGS

Lajeado, 15 de julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Tania e Alcir (*in memorian*), por todo apoio e confiança depositados em mim, por acreditarem e incentivarem todos os dias a batalhar pelos meus sonhos, por me ensinarem a nunca desistir. Pai, cheguei ao final desta etapa, queria muito que você estivesse aqui. Dedico essa conquista à você e a mãe. Amo vocês!

Aos meus irmãos, Iasmyn e Pedro Henrique, pelo carinho e pelos conselhos, por compreenderem a minha ausência todas essas noites e por vibrarem comigo a cada descoberta. Vocês são meu porto seguro.

Ao meu melhor amigo, meu parceiro de vida, Marcelo, por todo carinho e compreensão tidos a mim durante todos esses anos de Engenharia Civil, por participar e por vivenciar cada experiência, e chegar comigo até o final desta etapa. Também agradeço à família Cozer por terem me acolhido e por serem minha segunda família.

À minha professora, orientadora e amiga, Helena Leon, por ter acreditado em mim e por ter crescido comigo todos os dias, por sua paciência, por compreender minhas dificuldades e me ajudar a enfrentá-las. Você é meu exemplo, teus ensinamentos e tua dedicação me transformaram como pessoa e como futura profissional. Obrigada por aceitar esse desafio, saiba que este trabalho é mérito seu, também. Vamos em frente!

Também, agradeço ao professor João Rodrigo Guerreiro Mattos pelo incentivo e apoio na iniciativa desta pesquisa, desenvolvida ainda na disciplina de Mecânica dos Solos II. Teus ensinamentos me motivaram a seguir estudando a área geotécnica.

Ao pessoal do LATEC, Vianeí, Amanda e Henrique, pela ajuda e companheirismo no desenvolvimento dos ensaios, vocês são uma parte muito importante dessa história. Também, aos meus colegas do GEPEG, que não mediram esforços em ajudar na produção da cinza.

Engenheiro Civil, Diego Troian, meu chefe e amigo, e a toda família Troian, que me acolheram desde o início dessa história, acompanharam cada etapa do meu aprendizado, compreenderam minhas faltas, estiveram comigo em todos os momentos importantes, agradeço por cada ensinamento e cada palavra de incentivo.

Enfim, agradeço a todos que me enviaram energias positivas para que eu continuasse nesta jornada em busca do sonho de ser Engenheira Civil, muito obrigada!

RESUMO

A estabilização é um método capaz de satisfazer requisitos de resistência e durabilidade de um solo, sendo assim, a busca por novos produtos que beneficiem essas propriedades é constantemente estudada na área geotécnica. Atento a isso, este trabalho buscou estudar a cinza da folha de bambu (CFB) como um potencial material pozolânico, analisando o seu comportamento, em conjunto com a cal de carbureto (CC), subproduto obtido da produção do gás acetileno, na estabilização de um solo arenoso. Para determinação da temperatura de queima, caracterização química e controle de qualidade da cinza produzida, foram realizados os ensaios de termogravimetria (TGA), fluorescência de raios X (FRX), difração de raios-X (DRX), área superficial específica (BET), classificação pozolânica e método Chapelle modificado. A CFB foi utilizada em diferentes dosagens, em combinação com a CC, a fim de analisar sua influência nas propriedades mecânicas de uma areia fina uniforme. As dosagens foram definidas através de um projeto de experimentos fatorial 2^k , com 2 fatores e 1 ponto central ($2^2 + 1$ PC), realizados em duplicatas, sendo os fatores controláveis o teor da CFB (10 e 30%) e o peso específico aparente seco - γ_d (14,5 e 16,5 kN/m³), e os fatores constantes a CC (5%) e o teor de umidade (14%). No total, foram moldadas 10 amostras, mantidas em cura por 28 dias. Então, verificou-se a influência dos fatores controláveis através dos ensaios de resistência à compressão simples (qu) e módulo cisalhante inicial (G_0) das amostras, assim como sua relação com o parâmetro porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}). Os resultados obtidos mostraram que o aumento no teor de CFB e γ_d acresceram nos valores de resistência e rigidez das amostras, sendo que o teor de CFB mostrou ter maior influência nas variáveis respostas. Em relação ao parâmetro η/B_{iv} , quanto menor o seu valor, maiores serão a resistência (qu) e o módulo cisalhante (G_0) alcançado. Constatou-se, então, que a CFB foi adequada, mostrando ser um material pozolânico com notável reatividade. Ainda, foi possível prever o comportamento das misturas através da utilização do índice η/B_{iv} .

Palavras-Chave: Cinza da folha de bambu. Material Pozolânico. Estabilização de Solos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Problema de pesquisa	10
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo geral	10
1.2.2 Objetivos específicos	11
1.3 Justificativa da pesquisa	11
1.4 Delimitação	11
1.5 Limitação	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Estabilização de solos	13
2.1.1 Estabilização e melhoramento dos solos	14
2.2 Métodos de estabilização	16
2.2.1 Estabilização química	19
2.2.1.1 Estabilização com cimento	21
2.2.1.2 Estabilização com cal	24
2.3 Materiais pozolânicos	29
2.4 Cinza da folha de bambu (CFB)	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 Materiais	36
3.1.1 Areia de Osório	36
3.1.2 Cinza da folha de bambu	38
3.1.2.1 Produção da cinza da folha de bambu (CFB)	38
3.1.2.2 Beneficiamento da cinza da folha de bambu	41
3.1.3 Cal de carbureto	42
3.2 Caracterização dos materiais	43
3.2.1 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação	44
3.2.2 Análise granulométrica a laser	46

3.2.3 Classificação do solo (AASHTO e SUCS)	48
3.2.4 Índice de vazios mínimo e máximo	50
3.2.5 Massa específica dos grãos	50
3.2.6 Termogravimetria (TGA)	51
3.2.7 Área superficial específica (BET)	52
3.2.8 Fluorescência de raios-X (FRX)	52
3.2.9 Difração de raios-X (DRX)	53
3.2.10 Classificação pozolânica	55
3.2.11 Método Chapelle modificado	56
3.3 Programa experimental	57
3.3.1 Projeto Experimental Fatorial 2^k	57
3.3.2 Moldagem das amostras	61
3.3.3 Parâmetro η/B_{iv}	63
3.3.4 Ensaio de pulso ultrassônico	65
3.3.5 Ensaio de resistência à compressão simples (qu)	66
 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	 68
4.1 Resistência à Compressão Simples (qu)	68
4.2 Módulo cisalhante inicial (G_0)	71
4.3 Análise estatística	74
4.3.1 Análise de Variância para qu	74
4.3.2 Análise de Variância para G_0	76
4.4 Influência do índice η/B_{iv} nas variáveis respostas	77
4.4.1 Influência do índice η/B_{iv} em relação a qu	78
4.4.2 Influência do índice η/B_{iv} em relação a G_0	80
 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 82
5.1 Conclusões	82
 REFERÊNCIAS	 84

1 INTRODUÇÃO

Para Drumond e Wiedman (2017), o bambu é uma gramínea com grande distribuição geográfica. É uma planta de rápido crescimento, que se adapta aos mais diversos tipos de climas e solos. O Brasil possui a maior diversidade de bambus do mundo, pois dispõe de clima favorável e grandes áreas degradadas inaptas para outros cultivos, mas que são adequadas para o plantio de bambu à valor comercial. A maior ocorrência da planta são em áreas quentes e chuvosas, como nas regiões tropicais e subtropicais da América do Sul, África e Ásia, sendo umas das maiores florestas nativas encontradas na Amazônia.

Devido seu rápido crescimento, o bambu tem potencial de substituição da madeira em quase todos os usos. Moreira (2012), em sua pesquisa, explica que uma dessas atribuições é na geração de energia, pois o bambu tem alto poder calorífico e seu rendimento por hectare é bastante competitivo. Segundo o autor, um exemplo é a substituição do eucalipto pelo bambu na geração de carvão vegetal. Uma das vantagens do uso dessa planta em relação ao eucalipto é a idade ideal de corte ser aos quatro anos, sendo que, nesta mesma idade, o eucalipto é ainda inadequado (idade de corte adequado para o eucalipto é aos sete anos).

Já para Guarnetti (2013), a utilização do bambu como fonte de biomassa para cogeração de energia (térmica e elétrica) é avaliada positivamente devido ela ser uma planta perene, ou seja, não necessita de replantio, e isso reflete positivamente nos aspectos econômicos. Por não necessitar de replantio, o solo não sofre processos erosivos prejudiciais, favorável aos aspectos ambientais. Vale ressaltar que o aproveitamento energético da biomassa do bambu já é realidade no Brasil. Na Bahia, o Grupo Penha, unidade industrial

Santo Amaro, explora cerca de 3 mil hectares de biomassa de bambu, voltado para fins energéticos, no processo de reciclagem de papel.

No entanto, o uso de bambu gera um desperdício: as suas folhas. Elas são queimadas em aterros sanitários, gerando a cinza da folha de bambu (CFB), que não possui um objetivo adequado, tornando-se uma fonte de poluição (SCURLOCK; DAYTON; HAMES, 2000). Por isso o uso da CFB como material aditivo para melhoria do solo ainda é uma novidade, sendo o assunto muito pouco pesquisado, como pode ser observado na escassa literatura disponível.

No entanto, pesquisas foram realizadas para transformar esse resíduo em uma alternativa sustentável para a construção civil, principalmente em aplicações de cimento e concreto. Villar-Cociña et al. 2010, Frías et al. 2012, Villar-Cociña et al. 2016, Moraes et al. (2019) concluíram que as cinzas das folhas de bambu apresentam bom comportamento pozolânico e alta reatividade.

A estabilização química tem sido frequentemente estudada para melhorar a resistência, a durabilidade e outras propriedades de solos inicialmente inapropriados para uso como materiais de terraplenagem. Essa técnica geralmente emprega cimento Portland, no entanto, o desenvolvimento de alternativas, como a reutilização de resíduos agroindustriais, geralmente resulta em benefícios ambientais e econômicos. Nesse contexto, a cinza da folha de bambu (CFB), que é um resíduo agrícola, ao mesmo tempo que a cal de carbureto (CC), que é um resíduo industrial, tem potencial para ser usada como material estabilizador (INGLES;METCALF, 1972).

As reações químicas pozolânicas ocorrem entre a sílica amorfa presente na pozolana e o hidróxido de cálcio da cal, formando silicatos hidratados, melhorando as propriedades mecânicas da matriz (MASSAZZA, 1998; SALDANHA;CONSOLI, 2016). É importante notar que os solos arenosos não reagem com a cal, assim, a coesão entre os grãos de areia ocorre a partir do adesivo entre os grãos através do material de cimentação criado pelas reações pozolânicas (INGLES;METCALF, 1972). É essencial que esses óxidos apresentem uma forma amorfa para que a reação ocorra, portanto, a temperatura atingida e o processo de resfriamento na produção de pozolana são de extrema importância. Altas temperaturas e longos períodos de tratamento térmico, bem como o método de aquecimento/resfriamento,

podem levar à cristalização das partículas do material, conforme demonstrado por Villar-Cociña et al. (2016).

Desta forma, esta pesquisa tem o intuito de produzir e caracterizar a cinza da folha de bambu, a fim de avaliá-la como um possível material pozolânico com propriedades específicas para ser utilizado como um produto estabilizador de solos. Deste modo, são testadas as aplicações práticas da CFB e da CC, agindo em conjunto como ligante, melhorando as propriedades mecânicas de um solo arenoso. As propriedades mecânicas são avaliadas em termos de resistência à compressão não confinada (qu) e do módulo de cisalhamento em pequenas deformações (G_0). Todo o projeto de experimentos foi realizado em uma base estatística, e uma análise de variância (ANOVA) demonstra a significância dos fatores controlados.

Dessa forma, foi necessária uma metodologia de dosagem racional, a fim de levar em consideração os efeitos dos diversos fatores que governam o comportamento mecânico das misturas estabilizadoras do solo, como porosidade, quantidades de CFB e CC. Assim, este estudo amplia a aplicação do índice de porosidade/ teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}), proposto por Consoli et al. (2018), para um novo material composto por CFB e CC. O índice η/B_{iv} , nesse caso, considera o conteúdo volumétrico do ligante como a soma do conteúdo volumétrico de CFB e do conteúdo volumétrico da CC das misturas.

1.1 Problema de pesquisa

É possível produzir uma cinza da folha de bambu para utilizá-la como um material capaz de atribuir melhorias significativas na resistência e rigidez de um solo arenoso?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento mecânico de um solo estabilizado com uma cinza produzida a partir de folhas de bambu.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) padronizar um procedimento para a produção de cinza a partir da queima das folhas de bambu em condições controladas;
- b) analisar o potencial pozolânico da cinza produzida;
- c) caracterizar quimicamente a cinza da folha de bambu;
- d) analisar o comportamento mecânico de misturas produzidas com a adição da cinza de bambu produzida, em conjunto com cal de Carbureto e areia de Osório;
- e) verificar a influência da compactação, através do peso específico aparente seco de moldagem, das misturas na resistência à compressão simples (qu) e no módulo cisalhante inicial (G_0);
- f) verificar a influência de diferentes teores de cinza da folha de bambu adicionado às misturas na resistência à compressão simples (qu) e no módulo cisalhante inicial (G_0);
- g) julgar qual das variáveis (teor de cinza da folha de bambu ou peso específico aparente seco) exerce maior influência no comportamento mecânico das dosagens.

1.3 Justificativa da pesquisa

Avaliar a atividade pozolânica da cinza da folha de bambu como um novo material para o meio geotécnico, em conjunto com a cal de carbureto, na estabilização de um solo arenoso. Sendo assim, poderá se comprovar as propriedades cinza da folha de bambu e sua capacidade em proporcionar resistência a este solo, visto que a areia pura possui nenhuma resistência quando não-confinada. Ainda, a cinza da folha de bambu, gerada pela queima em aterros sanitários, tem a possibilidade de ser reaproveitada e reconhecida como um subproduto sustentável, visto que seria um material descartado e atribuído como fonte de poluição.

1.4 Delimitação

O presente estudo é delimitado à realização de análises de estudo geotécnico, sendo analisados diferentes teores de cinza da folha de bambu em uma areia de Osório, a fim de avaliar o melhoramento das propriedades deste solo através de ensaios de resistência à

compressão simples (q_u) e do módulo cisalhante inicial (G_0). Estudos sobre a adequação dessa cinza para o uso em concreto, argamassas e pastas não serão abordados, pois não são o foco desta pesquisa.

1.5 Limitação

Este estudo está limitado à quantidade de cinza produzida, visto que o processo de queima da cinza em laboratório, com condições controladas, não possui um alto rendimento. Dessa forma, não foram realizados ensaios de compactação utilizando a cinza da folha de bambu e o número de amostras moldadas foi reduzido, devido à insuficiência de material. Para tanto, a determinação dos pesos específicos aparente secos e umidade de moldagem seguiram padrões da literatura. As dosagens foram calculadas através de um projeto de experimentos fatorial $2k + 1PC$ e analisadas estatisticamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as definições sobre estabilização e melhoramento de solos, assim como os métodos adequados para cada tipo de projeto. Além disso, são revisados os principais tipos de estabilização utilizados na construção civil, como forma de melhoramento das propriedades do solo, além de uma sucinta contextualização sobre materiais pozolânicos, em destaque a cinza da folha de bambu, que é a base do procedimento experimental que será realizado ao longo deste trabalho.

2.1 Estabilização de solos

Desde a antiguidade, o emprego do solo em obras civis foi fundamental para o desenvolvimento das sociedades, provando assim, a necessidade de entender melhor seu comportamento. Por essa razão, nos dias de hoje, engenheiros seguem estudando as propriedades e as técnicas de uso do solo, principalmente para seu uso em obras de fundações, estradas, contenção, aterros, barragens e escavações subterrâneas (LAMBE;WHITMAN, 1969).

Segundo Núñez (1991), o solo é visto como um material variável e complexo, porém, devido à sua abundância e baixo custo, oferece muitas oportunidades em obras de engenharia. É muito comum que um solo de uma determinada localidade não preencha de certa forma as exigências de projeto, por isso, a realização de obras em solos com características geotécnicas desfavoráveis, torna-se, na maioria das vezes, economicamente inviável. Por isso, é necessário fazer a escolha entre:

- a) aceitar o material existente e otimizar o projeto dentro das suas limitações;

- b) substituir o material existente por outro mais qualificado, ou
- c) melhorar as propriedades do solo existente, tornando-o capaz de atender as especificações do projeto.

A última escolha é definida como estabilização de solos. Ingles e Metcalf (1972) descrevem-a como um método capaz de promover melhorias em uma ou mais propriedades de um solo, dentre as principais associadas a resistência, deformação, permeabilidade e durabilidade. Assim, o resultado da estabilização é um novo material geotécnico com propriedades próprias, tornando-o capaz de responder de forma satisfatória às solicitações previstas, sendo, além disso, uma alternativa viável em questões técnicas e econômicas (PRIETTO, 1996; CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, 2015).

Deve-se verificar que na estabilização nem toda e qualquer característica pode ser alterada, de modo a considerá-la um processo infalível, por isso, para uma correta aplicação é necessário identificar claramente as propriedades do solo a serem melhoradas. Sendo assim, a estabilização não deve ser pensada apenas como uma correção nas propriedades naturais de um solo, mas também como um modo de prevenir condições adversas que possam ocorrer durante a vida útil da obra (CRISTELO, 2001).

2.1.1 Estabilização e melhoramento dos solos

As técnicas de estabilização ou melhoramento um solo compreendem a aplicação de qualquer processo de natureza mecânica, física ou química, com efeito de modificar as propriedades dos solos de modo a melhorar o seu comportamento. Um exemplo são as misturas de solo e estabilizante compactadas e camadas estabilizadas de solos, que são designações indistintas de solos melhorados para solos estabilizados (NÚÑEZ, 1991).

A adição de materiais ao solo, tem sido denominada de diferentes formas por diversos autores, sendo comumente utilizados termos como solo estabilizado, solo tratado, solo modificado, solo melhorado, dependendo do grau de alteração nas propriedades do material.

A *American Concrete Institute* (ACI) define estabilização como a técnica que satisfaz requisitos como durabilidade e/ou resistência, à medida que solo melhorado tem suas

propriedades relativamente modificadas, tais como, melhoria da plasticidade, variação volumétrica e na capacidade de suporte. Para Foppa (2005) os critérios para definição de estabilização ou melhoramento dos solos dependem do grau de alteração das propriedades no seu estado natural, porém, conceitualmente os processos são os mesmos, visando promover melhorias no comportamento dos solos empregados.

Ainda, Prietto (1996) explica que os processos de melhoramento e estabilização se diferem quanto ao acréscimo de durabilidade e resistência de acordo com a porcentagem de aditivos e no tempo de compactação. Como exemplo, adições de cimento em até 2% modificam (melhoram) as propriedades do solo enquanto que teores maiores alteram radicalmente as suas propriedades (INGLES; METCALF, 1972). No caso da cal, a adição ideal para as alterações da plasticidade do solo são condicionadas entre 1% e 3%, superior a isso as alterações pela combinação da cal são usadas para modificar a resistência do solo (USACE, 1994).

Sobre os aspectos práticos de melhoramento do solo, Mitchell (1981) inclui considerações como o tipo de solo mais adequado para o tratamento, propriedades dos solos tratados, eficácia do tratamento, principais aplicações e os custos relativos. Baseado nisso, o autor relaciona os principais métodos utilizados:

- a) compactação;
- b) consolidação por eletro-osmose, pré-carregamento e/ou drenos verticais;
- c) injeção de materiais estabilizantes (grouting);
- d) estabilização por processos físico-químicos;
- e) estabilização térmica;
- f) reforço de solos com a inserção de elementos resistentes (geotêxteis por ex.).

Dentre as inúmeras técnicas de melhoramento de solo, o processo mais simples é obtido através da compactação, como exemplo, a compactação dinâmica, que utiliza a alta energia de compactação para recompor solos um tanto fracos. Outra forma muito utilizada de obter melhoria nas propriedades do solo é através da adição de pequenos teores de cimento, cal, betume, pozolanas, entre outros aditivos.

Núñez (1991) explica que solo melhorado com cal ou cimento são misturas que possuem baixo teor de estabilizante e, por isso, não apresentam características para uso em bases de pavimentos rodoviários, porém, manifestam melhorias em outras propriedades como variação volumétrica, plasticidade, por isso, são utilizados como reforço e melhoria do subleito em obras de pavimentação. Ainda, segundo o autor, para a camada de base de pavimentos rodoviários são utilizadas misturas de solo-cal ou solo-cimento, garantindo durabilidade e resistência ao solo em questão.

2.2 Métodos de estabilização

A estabilização de um solo, além de considerar fatores como características do material e propriedades a serem alteradas, é influenciada pelos custos totais da obra e sua finalidade. Quanto mais elevado é o padrão de uma obra, maior é a exigência sob qualidade e durabilidade, porém, nem sempre o material natural possui propriedades adequadas, e substituí-lo torna-se economicamente inviável. Desta forma, sobrevém a hipótese de utilizar o próprio material encontrado em obra (CRISTELO, 2001).

Sendo assim, estabilizar o solo inapropriado é o caminho mais simples e econômico para melhorar as propriedades específicas, garantindo, de tal maneira, a resistência e durabilidade exigidas em obras de engenharia (BASHA et al., 2005).

Segundo Ingles e Metcalf (1972), a grande variabilidade dos solos incide em diferentes maneiras de alterar suas propriedades, sendo assim, um método pode se adequar a um determinado solo, porém, não ser bem sucedido à outro devido suas características distintas. Por isso, além de conhecer as características de cada material, é importante conhecer as propriedades dos estabilizadores.

A aplicação de procedimentos específicos de estabilização pode ser classificada em três grupos, segundo Cristelo (2001):

- a) métodos de estabilização mecânica: significa melhorar as propriedades dos solos sem a mistura de aditivos. Esta técnica é feita basicamente da compactação, da mistura de

variados solos (granulometria) e/ou drenagem, para fins de redução dos vazios entre as partículas sólidas;

- b) métodos de estabilização física: melhora as propriedades do solo modificando a sua textura a partir da ação térmica ou elétrica;
- c) métodos de estabilização química: são técnicas que modificam permanentemente as propriedades do solo através da adição de aditivos que promovem a união das partículas.

A compactação é um método mecânico de estabilização empregada em inúmeras obras de engenharia, como em camadas construtivas de pavimentos, aterros, construção de barragens de terra, preenchimento de valas, entre outros. Ela visa aumentar o contato entre os grãos e tornar o solo mais homogêneo através de sucessivas cargas, sendo que o perfil de obra e o solo disponível irão determinar o modelo de compactação a ser adotado, a umidade do solo naquele momento e a densidade a ser obtida (PINTO, 2006).

Outro processo mecânico é a estabilização mediante correção granulométrica, que consiste em misturar diversos solos com diferentes diâmetros de grãos, onde os vazios dos grãos maiores são ocupados pelos grãos médios, e o vazios desses grão médios, pelos grãos finos. Essa estrutura densa resulta em um material de massa específica aparente eminente a de seus componentes, dando-lhe maior impermeabilidade e resistência (SENÇO, 2001). Geralmente, as técnicas de estabilização mecânica são combinadas, visto que a compactação é necessária em quase todos os casos (KÉZDI, 1979).

A técnica de estabilização física compreende reações térmicas e elétricas. As reações por meios térmicos são obtidas através do aquecimento, congelamento ou termo-osmose. O aquecimento busca reordenar a rede cristalina dos minerais que constituem o solo. O congelamento é conhecido por ser uma solução temporária, onde se gelifica a água presente nos vazios do solo, alterando a sua textura. Já na termo-osmose ocorre a drenagem pela ação dos gradientes de temperatura na dissipação de um fluido entre os poros (CRISTELO, 2001). Como técnica de estabilização elétrica, Ingles e Metcalf (1972) citam a eletro-osmose, que consiste na remoção da água através da passagem de uma corrente elétrica por dois eletrodos em uma massa de solo.

O método de estabilização química é um dos métodos mais utilizados para a melhoria das propriedades de um solo, realizado por meio de adições como cimento, cal, pozolanas, betume, resíduos industriais, etc. Por ser a técnica escolhida para a realização dessa pesquisa, será apresentada com maior ênfase no próximo subitem.

Em geral, é considerável dizer que para areia usa-se cimento e para argila, a cal, porém isso despreza outros procedimento úteis na estabilização. Sendo assim, o Quadro 1 abrange as técnicas mais comuns de estabilização de solos - mecânica, cal, cimento e betume- acrescentando as razões para a escolha do determinado estabilizante.

Quadro 1 - Resposta dos principais componentes de solos à estabilização

<i>Principal Comp. do Solo</i>	<i>Estab. Recomendados</i>	<i>Motivos</i>
Matéria Orgânica	Mecânica	Outros métodos ineficientes
Areias	Argila	Maior estabilidade mecânica
	Cimento	Maior densidade e coesão
	Betume	Maior coesão
Siltes	Desconhecido	-
Alofanos	Cal	Reações pozolânicas e densificação
Caolinitas	Areia	Maior estabilidade mecânica
	Cimento	Ganho rápido de resistência
	Cal	Ganho rápido de trabalhabilidade e resistência a longo prazo
Ilitas	Cimento	Ganho rápido de resistência
	Cal	Ganho rápido de trabalhabilidade e resistência a longo prazo
Motmorilonitas	Cal	Ganho rápido de trabalhabilidade e resistência inicial
Cloritas	Cimento	Motivação apenas teóricas (sem experiências)

Fonte: Adaptado pela autora com base em Ingles e Metcalf (1972).

A interação de cada aditivo com o solo ocorre de forma particular, seja através da modificação mineralógica, da cimentação, da troca de íons, polimerização, precipitação, entre outros. Geralmente, a estabilização com o uso de cimento produz bons resultados na maioria dos componentes dos solos.

Em solos granulares, como a areia, além do cimento ou betume, o uso da argila, como material fino, pode melhorar a sua distribuição granulométrica. Nos materiais com granulometria mais fina (Alofanos, Caolinitas, Ilitas e Motmorilonitas), a cal, ao entrar em

contato com os argilominerais presentes em suas estruturas, gera uma reação pozolânica, manifestando melhorias nas propriedades desses componentes. Já os solos compostos por matéria orgânica e silte não manifestam melhoras consideráveis quando estabilizados quimicamente. Croft (1967) orienta que devem ser realizados testes experimentais para determinação do agente estabilizador mais apropriado e a quantidade necessária à cada tipo de solo.

2.2.1 Estabilização química

Estabilizar um solo quimicamente significa alterar suas propriedades com objetivo de melhorar seu comportamento. A técnica consiste em adicionar um certo produto químico ao solo, com objetivo de controlar ou melhorar a estabilidade volumétrica, a resistência e as propriedades de tensão-deformação do material (BRITO; PARANHOS, 2017).

As alterações do solo, pelo processo químico, são permanentes. A estabilização química se dá pela relação do aditivo estabilizador com os minerais do solo ou pela reação química no contato entre adição mineral e água, de modo que, as resultantes dessas reações irão determinar o sucesso da estabilização. Geralmente, os agentes químicos mais usados para fins de estabilização são o cimento, a cal, a cinza volante e emulsões betuminosas (MEDINA; MOTTA, 2005).

Silva (2007) explica que as reações pela adição de químicos ao solo podem ser geradas através de quatro mecanismos: troca de cátions adsorvidos por cátions hidrorrepelentes e substituição das moléculas de água; formação de ligações reforçadas entre as partículas dos agregados pela inserção de ligantes; floculação e dispersão.

Nos solos argilosos, existem estruturas dispersas e floculadas sensíveis à presença de água, que acabam interferindo na resistência ao cisalhamento. Nesse caso, a adição de um agente químico ajudará na dispersão e na floculação das partículas, bem como a adição de cimentos contribuirá para uma prévia alteração de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes. Em solos granulares, a interação do ligante nos pontos de contato entre grãos tende a melhorar sua resistência cisalhante (GOULARTE; PEDREIRA, 2009).

Segundo Kédzi (1979), os métodos de estabilização química são classificados conforme a interação entre o produto químico e as partículas do solo, podendo ocorrer da seguinte forma:

- a) o produto químico exerce um efeito por meio da interação com o solo ou com as partículas do solo. Desta forma, as propriedades físicas do produto químico empregado é pouco significativa;
- b) a interação e as propriedades físicas do produto químico exercem um efeito conjunto;
- c) as propriedades físicas do aditivo usado são de importância decisiva, enquanto as do solo importam menos.

Ainda, o autor elucida que o estabilizador pode formar uma matriz contínua ou descontínua do solo. Se a matriz for contínua, significa que o estabilizador preencheu todos os poros, e as partículas ficam mergulhadas no aditivo químico como um enchimento inerte. Neste caso, as características do sistema serão governadas pelo estabilizador, como exemplo, o betume. No caso da matriz descontínua o estabilizador (exemplo, cimento ou cal) não preenche todos os poros, e seu modo de ação ocorre através da mudança das propriedades da superfície das partículas do solo, do preenchimento dos vazios intergranulares com um material inerte, e da conexão das partículas do solo em alguns pontos (solda a ponto).

Dentre os estabilizadores, os mais utilizados são o cimento e a cal. Nas misturas solo-cal e solo-cimento, o princípio da reação se caracteriza como físico-química, onde os cátions Ca^{++} liberados na hidratação do cimento, reagem com a superfície dos argilominerais, alterando, dessa forma, o pH da solução eletrolítica. Posteriormente formam-se produtos cimentantes (silicatos hidratados de cálcio (*CSH*) e/ou sílico-aluminatos hidratados de cálcio (*CASH*)) por meio das reações pozolânicas entre os argilominerais procedentes do solo e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) resultantes da cal ou do processo de hidratação do cimento, que acrescem a rigidez da mistura (NUÑEZ, 1991). Para melhorar consideravelmente as propriedades do solo, o uso de adições pozolânicas, como a cinza volante, podem ser adicionados ao solo-cimento ou ao solo-cal, aumentando a disponibilidade de sílica presente para ocorrência de reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio.

A estabilização com cimento pode ser indicada para uma diversidade de solos, porém, sua aplicação mais corrente se dá aos solos granulares. Já a cal possui maior eficiência em solos de granulometria fina, onde o resultado da sua reação com os argilominerais contidos nas porções finas da granulometria, alteram a textura e a cimentação das partículas do solo (INGLES; METCALF, 1972).

2.2.1.1 Estabilização com cimento

Solo estabilizado com cimento, segundo a NBR 12253 (ABNT, 2012c) é um *“produto endurecido decorrente da cura de uma mistura compactada de solo, cimento e água, em proporções definidas por meio de dosagem”*. Para a American Concrete Institute (ACI, 2009) a mistura significa *“uma quantidade medida de cimento e água, compactada a uma alta densidade”*.

A técnica de solo-cimento é uma das mais usadas dentre os métodos estabilizadores, tendo sido comumente utilizada em base de pavimentos, proteção de taludes e barragens, camada de base para fundações rasas, revestimentos de canais, entre outros (CONSOLI et al., 2011a).

O cimento utilizado como estabilizador de solos é do tipo Portland, composto proveniente do calcário e da argila, que geram a combinação de óxidos de cálcio, alumínio, silício e ferro. A presença de sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3) são importantes para a obtenção de produtos com elevadas resistências.

Nos Estados Unidos, a estabilização de solos com uso do cimento ocorre desde o ano de 1915, quando em Sarasota, cidade localizada no estado americano da Flórida, construiu-se uma rua utilizando a mistura de conchas, cimento e areia. No ano de 2009, o país contabilizou mais de 200.000 km em pavimentos utilizando solo-cimento como base (ACI, 2009). Segundo Kézdi (1979), a primeira estrada estabilizada com cimento foi construída em 1935 em Johnsonville, na Carolina do Sul.

No Brasil, a primeira experiência de campo utilizando solo-cimento, foi realizada no acesso ao aeroporto de Bauru, em um trecho de 500 metros de extensão, com um teor de

cimento em 11%. Em seguida, foram pavimentados 14 km do acesso ao aeroporto de Presidente Prudente, utilizado teores de cimento variando entre 12% e 14% (SENÇO, 2001). Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a utilização de solo-cimento em pavimentos com base ou sub-base são empregados no Brasil desde 1939, na construção da estrada Caxambu-Areias, em Minas Gerais. Desde então, o país tem mais de 25.000 km executados com essa solução.

Outras utilizações de solo-cimento são citadas pelo *American Concrete Institute* (ACI, 2009), como por exemplo, a substituição de estacas por solo-cimento em um prédio comercial de 38 andares na cidade de Tampa, na Flórida, em 1980. Outra incrível obra foi abaixo de duas usinas nucleares em Koeberg, na África do Sul, com a substituição de uma camada de 5,5 metros de areia com potencial de liquefação.

O método utilizado na mistura de solo com cimento é similar ao concreto, o que os distingue é o agregado. No concreto, o agregado dispõe de uma granulometria grossa, e as partículas de cimento envolvem o agregado ligando suas partículas, atribuindo, dessa forma, grande resistência ao concreto. Já no solo-cimento, os grãos de solos finos envolvem as partículas de cimento, gerando ligações menos resistentes. Neste caso, a quantidade de cimento varia sobre o peso do solo o suficiente para estabilizá-lo, atingindo a resistência desejada no composto (VENDRUSCOLO, 2003).

Qualquer solo, com exceção dos materiais altamente orgânicos, pode ser tratado e melhorado com cimento. Ingles e Metcalf (1972) evidenciam que solos com alta plasticidade exigem grandes quantidades de cimento e equipamentos misturadores bastante enérgicos, enquanto os solos arenosos bem graduados e com plasticidade média/baixa, requerem baixos teores de aditivo, sendo facilmente misturáveis e alcançando maiores resistências. A Tabela 1 mostra um indicativo do teor de cimento de acordo com o tipo de solo para estabilização.

Tabela 1 - Previsão da quantidade de cimento em função do tipo de solo

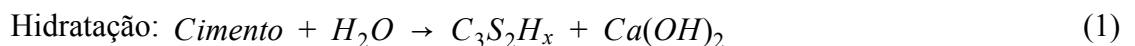
Tipo de solo	% de cimento
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argilas	8 a 15

Fonte: Adaptado pela autora com base em Ingles e Metcalf (1972).

As variáveis que controlam as características e propriedades da mistura solo-cimento são: tipo de solo, teor de cimento na mistura, umidade e grau de compactação. De maneira geral, a adição de cimento eleva a rigidez e a resistência, diminui a compressibilidade e altera os limites de consistência. Em pavimentações, por exemplo, a NBR 12253 (ABNT, 1992) diz que a resistência média à compressão deve ser igual ou superior a 2,1 MPa aos 7 dias de idade.

Para que haja a estabilização com cimento, é necessário que existam reações de hidratação e pozolânicas. Leon (2018) explica que a hidratação ocorre pela combinação de sílica, cálcio (silicato tricálcico (C_3S) ou silicato dicálcico (C_2S)) e água (H_2O), resultando na formação de silicato hidratado de cálcio, o CSH , e um excedente de cal hidratada ($Ca(OH)_2$ - hidróxido de cálcio), visto na Equação 1, ao qual sofre hidrólise (EQUAÇÃO 2) e combina-se com sílica ou alumina, onde resulta na formação de CSH ou CAH (aluminato hidratado de cálcio), conhecidas como reações secundárias (EQUAÇÕES 3 e 4). Conforme descrito por Moh *apud* Vendruscolo (2003), as equações das reações de solo-cimento podem ser representadas da seguinte forma:

Reações primárias:



Reações Secundárias:



As Equações 3 e 4 são chamadas de reações pozolânicas e acontecem de forma mais lenta. Em solos granulares, a cimentação se dá por meio das reações primárias e, em solos argilosos, por meio das reações secundárias (NUÑEZ, 1991).

Bell (1975) explica que a cimentação em solos granulares ocorre através dos produtos gerados na hidratação e hidrólise do cimento, propiciando a junção dos grãos nos seus pontos de contato, aumentando assim a resistência ao cisalhamento. Esse aumento real de resistência dependerá da distribuição granulométrica, do baixo índice de vazios e do número de pontos de contato entre os grãos.

Nas argilas, Ceratti e Casanova (1988) explicam que durante fase de hidratação e hidrólise do cimento a cal é liberada, elevando o pH em aproximadamente 12 e diminuindo a fase líquida. Após minutos se observa forte floculação. Na segunda fase acontece a formação de substâncias cimentantes devido a presença de sílica e alumina na matriz do solo, ocasionando a cimentação dos grãos de argila floculados nos pontos de contato, ou seja, há o aumento da ligação entre as partículas gerando estabilidade ao conjunto.

Os solos granulares, quando misturados com cimento, respondem de forma satisfatória à estabilização, enquanto que os solos argilosos reagem melhor com a cal. Essa reação com a argila ocasiona a diminuição do pH, prejudicando a hidratação e, conseqüentemente, o endurecimento do cimento. No momento em que o pH baixa, o composto $C_3S_2H_x$ reage outra vez, formando CSH e cal. Sendo $C_3S_2H_x$ responsável por grande parte da resistência da mistura, o surgimento de CSH torna-se indesejável quando provido deste composto, sendo favorável somente quando originado das reações da cal com os argilominerais. Portanto, na mistura solo-cimento, as reações hidratação do cimento são as mais importantes, pois respondem pela grande parte da resistência final (SZELIGA, 2014).

2.2.1.2 Estabilização com cal

Solo estabilizado com cal, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT, 2019), “*é um material estabilizado proveniente da mistura de solo, cal e*

água, em quantidades estabelecidas por processo de dosagem em laboratório, de maneira que apresente determinadas características de resistência, durabilidade e deformabilidade”.

Essa técnica é considerada uma das mais antigas para se obter estabilidade em solos instáveis. O uso da cal gera melhorias consideráveis na textura e na estrutura do solo, aumentando a resistência mecânica e reduzindo a plasticidade. Aliás, o aumento da resistência concebido na mistura solo-cal está associado ao seu mínimo potencial de deformação (CRISTELO, 2001).

Sua utilização é constante em obras de pavimentação, controle de erosão, estabilização de encostas e reforço de camadas superficiais de solo. Alguns relatos com a utilização de solo-cal em pistas experimentais no Brasil é citado por Guimarães (2002): Rodovia Cruz-Alta/Carazinho (BR-377/RS) – 2 trechos experimentais em solo argilo-arenoso e 4% de cal cálcica; Rodovia Curitiba/ Porto Alegre – próximo ao km 10, no Estado do Paraná, com 1000 metros de extensão, usando de 3% e 7% de cal em um solo siltoso; Aeroporto de Congonhas (São Paulo) – em uma área de 10.000 m² foi construída uma base de solo-cal-agregado, com 6% de cal hidratada, onde o material apresentou resistência à compressão simples de 1,5 MPa aos 28 dias; entre outros. Ainda, o autor cita que na Suécia, Noruega e Finlândia são construídos mais de 260 mil metros por ano de colunas solo-cal, sendo 40% em fundações de rodovias.

A cal é um produto químico aglomerante derivado de rochas carbonatadas cálcio-magnesianas. O produto resultante da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio magnésio, são, respectivamente, os óxidos de cálcio (CaO) e o cálcio-magnésio ($CaO - MgO$), denominados, em geral, como cal viva ou cal virgem. A cal hidratada é resultante da hidratação da cal viva. As reações de produção da cal viva e da cal hidratada, respectivamente, são representadas pelas Equações 5 e 6 (GUIMARÃES, 2002):



O produto obtido pela reação de hidratação mostrada acima, é chamada de cal cálcica. Da calcinação do calcário dolomítico, obtém-se a cal dolomítica, composta por óxido de cálcio e óxido de magnésio ($CaO - MgO$). Ainda, conforme Guimarães (2002), as cales

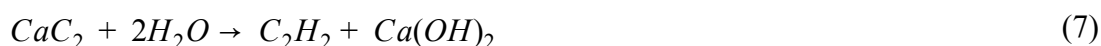
comercializadas no mercado brasileiro apresentam propriedades com valores médios mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição das cales brasileiras

Tipo de cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)	Perda ao Fogo (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO + MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)
Cal virgem cálcica	90–98	0,1–0,8	0,5–3,5	0,2–1,0	0,5–5,0	0,2–3,8	0,1–0,6	96–98,5	–
Cal hidratada cálcica	70–74	0,1–1,4	0,5–2,5	0,2–0,8	23–27	1,5–3,5	0,1–0,0		0,5–1,8
Cal hidratada dolomítica ou magnesiana	39–61	15–30	0,5–18,2	0,2–1,5	19–27	3,0–6,0	0,02–0,2	76–99	5 – 25
Cal virgem dolomítica ou magnesiana	51–61	30–37	0,5–4,5	0,2–1,0	0,5–4,8	0,5–4,5	0,05–0,1		–

Fonte: Adaptado pela autora com base em Guimarães (2002).

Com relação à cal de carbureto, utilizada nesta pesquisa, esta é obtida através da reação entre o carbureto de cálcio (CaC_2) e água (H_2O), definida pela Equação 7 (THOME,1994).



O autor explica que desta reação é possível obter o gás acetileno (C_2H_2), usado para o alcance de elevadas temperaturas por meio de sua queima, que é empregue em processos de solda, corte de metais e processos produtivos que precisam de temperaturas elevadas. Além da produção deste gás, ocorre a geração de um resíduo da composição básica, o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), em forma aquosa, levado para tanques de decantação, seguindo para o redutor de umidade. Saldanha (2014) explica que este resíduo é um potencial poluidor por conta da sua alta alcalinidade, por isso, é descartado em aterros ou comercializados.

A cal carbureto possui algumas características que restringem o seu uso na construção civil, como a sua granulometria mais grosseira e sua coloração levemente azulada. Para o concreto armado, ela é extremamente corrosiva em contato com o aço. Apesar disso, a cal

apresenta maior pureza comparada à cal dolomítica, comercializada no Rio Grande do Sul (THOMÉ, 1994)

As propriedades dos solos estabilizados com cal se assemelham às encontradas em solos estabilizados com cimento, o que os diferem é o efeito do conteúdo aditivo, o tempo de efeito e o efeito da temperatura. Na estabilização solo-cal, o ganho de resistência pode continuar por um longo período se as condições de cura forem adequadas. Ainda assim, a cal é um estabilizador bastante versátil (INGLES; METCALF, 1972).

Goularte e Pedreira (2009) explicam que na estabilização de solo-cal ocorrem diversos tipos de reações químicas, evidenciando as reações pozolânicas (cimentação), de troca catiônica e de floculação. As reações pozolânicas entre solo-cal dependem das características do solo a ser estabilizado. Essas reações ocasionam a formação de compostos de cimentação, que ajudam no acréscimo de resistência e durabilidade da mistura, que se desenvolvem a longo prazo. Já as reações por troca catiônica e floculação ocasionam alterações instantâneas na plasticidade e, em pequenas proporções, na resistência mecânica da mistura.

O fenômeno de troca catiônica ocorre pela substituição de cátions monovalentes por multivalentes. A adição de determinadas quantidades de cal cria uma concentração de Ca^{++} livre que são capazes de substituir de forma permanente outros íons metálicos, que são adsorvidos sobre a superfície coloidal através desse elemento (TRB, 1987).

Ainda, a *Transportation Research Board* (TRB,1987), explica que na presença de água, a cal tende a reagir com a sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) presentes no solo, formando, dessa forma, muitos compostos cimentantes, como o *CSH* (Silicato Hidratado de Cálcio) e *CAH* (Aluminato Hidratado de Cálcio). Em solos específicos, as prováveis fontes de sílica e alumina podem compreender os argilo-minerais, micas, quartzo, feldspatos e minerais silicosos ou alumino-silicosos, apresentando assim uma estrutura amorfa ou cristalina.

USACE (1994), explica que a reatividade da cal é mais expressiva em solos com média/alta plasticidade, a qual aumenta a resistência e a trabalhabilidade, e diminui a expansão volumétrica. Em solos granulares que contém argila ativa com alta expansão, há uma redução da capacidade de suporte, e no tratamento com a cal as suas propriedades podem

ser muito melhoradas. Em solos coesivos, a cal diminui a influência de água e reduz a expansão, ampliando assim o seu campo de aplicação. Já em solos com pouca ou nenhuma argila ou altamente orgânicos, a cal tem efeito reduzido (SENÇO, 2001; INGLES; METCALF, 1972).

A Tabela 3 apresenta a porção sugerida de cal para cada tipo de solo, considerando sua capacidade de suporte.

Tabela 3 - Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo

Tipo de Solo	Cal para Modificação (%)	Cal para Estabilização (%)
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	~ 3
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	~ 5
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

Fonte: Adaptado pela autora com base em Ingles e Metcalf (1972).

Em testes acerca de características mineralógicas, químicas e físicas dos solos tratados e não tratados com cal, constatou-se que testes simples de pH podem determinar a quantia necessária de cal na estabilização de um solo. Esse método funciona através da verificação de diferentes porcentagens de cal, com intuito de elevar o pH da mistura solo-cal em 12,4, mantendo esse valor constante até obter a porcentagem mínima de cal necessária para que aconteçam as reações pozolânicas, ou seja, quando ocorre o aumento da solubilidade da sílica e da alumina (EADES;GRIM, 1966).

Ainda assim, a cal não elimina a utilização simultânea de outros estabilizantes, ou seja, além de ser usada previamente na melhora das características do solo, ela também permite a recuperação desse solo na estabilização com outros aglomerantes. Por isso, para saber o aditivo mais indicado na estabilização é necessário levar em consideração a plasticidade e a granulometria do solo (USACE, 1994).

Craig e Knappett (2018) afirmam a importância de analisar a distribuição granulométrica do solo, de modo a classificar e identificar o comportamento característico do

material, como a sua resistência. Os solos resistentes são os bem graduados, enquanto solos finos e/ou com elevado índice de liquidez e plasticidade, estão dispostos a baixas resistências.

2.3 Materiais pozolânicos

Os materiais pozolânicos, segundo a A NBR 12653 (ABNT, 2015), são *“materiais silicosos ou silicoaluminosos com pouca ou nenhuma atividade aglomerante quando sozinhos, porém, ao serem finamente divididos e estando na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades aglomerantes”*.

Apesar de serem investigados há anos, esses materiais ainda não possuem uma regra específica a ser seguida, pois, como se trata de um grupo de materiais heterogêneos, somente pode-se afirmar que reagem com o hidróxido de cálcio e então adquirem propriedades aglomerantes. Esses materiais possuem certas características que auxiliam durante a reação com o hidróxido de cálcio, que são: a presença de sílica ou sílico-alumina amorfas, são materiais finos e possuem alta superfície específica (MORAES, 2019).

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) as pozolanas, quanto a sua origem, são divididas em dois grupos, podendo ser naturais ou artificiais. As naturais podem ser de origem sedimentar ou vulcânica, com atividade pozolânica; e as artificiais, como subprodutos de atividades industriais ou procedentes de tratamento térmico, com atividade pozolânica.

O material pozolânico de origem natural, com exceção da moagem, necessária para aumentar a área de contato para as reações, isenta qualquer tipo de tratamento para apresentar ou potencializar a sua pozolanicidade. Já nas pozolanas artificiais, frisando as que necessitam de beneficiamento, são feitos tratamentos a temperaturas elevadas que influenciam na cristalização do material, sendo que durante o resfriamento essas fases cristalinas são transformadas em amorfas, fornecendo reatividade ao material. O dióxido de silício (SiO_2) existente nos materiais pozolânicos, contém fases polimórficas (mais de uma estrutura cristalina) como quartzo, tridimita, cristobalita, entre outras. Os materiais que possuem

estrutura desordenada (amorfa), são os que contêm maior reatividade, em comparação com os de estrutura cristalina (CORDEIRO, 2006).

A NBR 12653 (ABNT, 2015) classifica os materiais pozolânicos quanto a sua origem, por meio de três classes, apresentadas da seguinte forma:

- a) classe N: Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas;
- b) classe C: Pozolana gerada através da combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoeletricas;
- c) classe E: Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

Ainda, a norma estabelece que o material pozolânico deve estar em conformidade com alguns requisitos físicos, conforme apresentado na Tabela 4. Os materiais estudados passam pelos ensaios de resistência mecânica e caracterização física, e esses requisitos são exigências a serem satisfeitas.

Tabela 4 - Requisitos Físicos dos Materiais Pozolânicos

Propriedades	Classe do material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 µm	≤ 20%	≤ 20%	≤ 20%
Índice de atividade pozolânica			
- Com cimento aos 28 dias em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%
- Com a cal aos 7 dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa

Fonte: Adaptado pela autora com base na NBR 12653 (ABNT, 2014).

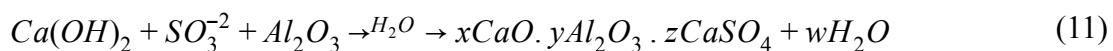
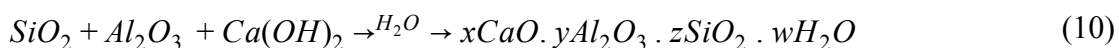
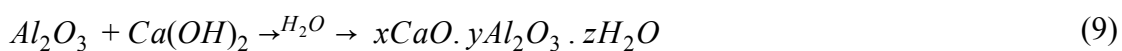
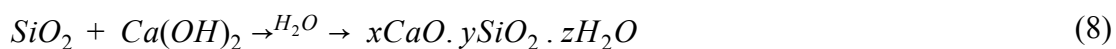
A Tabela 5 exibe um comparativo na composição química elementar de algumas adições pozolânicas conhecidas, tendo como característica em comum o alto teor de SiO_2 . A utilização dessas adições pode reduzir o custo do produto final em aplicações na engenharia civil.

Tabela 5 - Análise química de materiais pozolânicos conhecidos

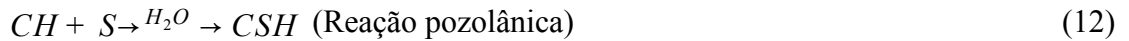
Composição Química (%)	Amostras			
	Cinza de Casca de Arroz	Metacaulim	Sílica Ativa	Cinza Volante
SiO₂	88,94	45,86	92,49	57,80
K₂O	4,18	-	2,76	3,00
Fe₂O₃	0,11	3,90	0,13	6,20
CaO	1,10	0,14	0,51	1,60
Al₂O₃	2,42	46,05	1,91	26,30
P₂O₃	0,24	-	-	0,10
TiO₂	-	2,22	-	1,30
SO₂	2,08	1,69	2,08	0,30
MgO	-	-	-	0,80
ZnO	0,01	0,01	0,02	0,09
MnO	0,88	0,01	0,07	0,09
CuO	0,02	0,01	0,02	-
Rb₂O	0,02	0,01	0,01	0,10
Tm₂O₃	0,00	-	-	-
SrO	-	0,01	-	0,10

Fonte: Adaptado pela autora com base em Raisdorfer (2015).

A propriedade cimentícia dos materiais pozolânicos se desenvolve na presença de cal, conforme as Equações 8, 9 10 e 11. As abreviações dos elementos químicos presentes nos produtos formados conforme a convenção, são: C = CaO ; S = SiO_2 ; A = Al_2O_3 ; e H = H_2O (MINNICK, 1967):



Essas equações decorrem da composição do material pozolânico, sendo assim, se for silicoso, ocorre a primeira reação (EQUAÇÃO 8), porém, se for sílico-aluminoso, ocorrem as três primeiras (EQUAÇÕES 8, 9 e 10). Dessa forma, a sílica é o componente mais importante nos materiais pozolânicos, evidenciando assim a Equação 8, que pode ser reescrita conforme mostra a Equação 12 (MEHTA, 1987):



A sílica amorfa é a mais importante fase ativa das pozolanas e, quando em contato com água, na temperatura ambiente, solubiliza em meio alcalino e reage com íons Ca^{++} , formando assim o silicato de cálcio hidratado (CSH). O CSH formado é similar ao CSH produzido nas reações de solo-cimento (ver Equações 1, 2, 3 e 4) e as mesmas reações obtidas em solo-cal. Os materiais pozolânicos, na presença do cimento, desenvolvem potenciais propriedades aglomerantes (BAUER, 1993).

Vieira (2005), explica que para ocorrer a reação entre os materiais pozolânicos e a cal, formando compostos aglomerantes, o silício e o alumínio devem estar em baixo grau cristalino, atômica e molecularmente desordenados. Por isso, quanto maior for o arranjo estrutural e sua instabilidade em meio básico, mais intensa será a reação pozolânica.

Existem dois importantes fatores na reatividade pozolânica: a parcela de hidróxido de cálcio (CH) combinado e os fatores que induzem à velocidade de combinação, sendo que a quantidade de CH combinado depende da quantidade e natureza das fases ativas, da quantidade de sílica amorfa e da ligação hidróxido de cálcio - pozolana na mistura. A velocidade de combinação está relacionada à área superficial específica (LANA, 2017).

Segundo Thashima (2006), quando a temperatura de combustão do produto da cinza ultrapassa o recomendado, é obtida uma cinza parcialmente cristalina e, conseqüentemente, há uma diminuição da atividade pozolânica, sendo que a medida que aumenta essa temperatura, maior é a presença das fases cristalinas. Outro fato relevante é em relação ao tempo de queima, onde tempos muito longos também resultam em cinzas com caráter cristalino.

Na estabilização de um solo, a ligação entre a pozolana (como exemplo, cinza volante, cinza de casca de arroz e/ou pó de vidro moído) e o hidróxido de cálcio, irá melhorar as características mecânicas deste por meio da formação de uma matriz cimentícia (MASSAZA, 2004).

A cinza volante, oriundo da combustão de carvão granulado ou pulverizado, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015), quando finamente dividido, possui significativa quantidade de sílica e alumina na sua composição, visto na Tabela 5, e seu emprego como material

estabilizante aumenta de forma exponencial a resistência dos solos, reduzindo o teor de umidade ótima e o número de vazios (OTOKO, 2014).

Na cinza da casca de arroz (CCA), segundo Thashima (2006), composta basicamente por sílica, sua atividade pozolânica está totalmente relacionada ao processo de combustão da casca de arroz (CA). Este material é considerado, pelos pesquisadores, uma fonte alternativa no alcance de sílica amorfa e de elevado grau de reatividade. Behak (2007), explica que as reações desenvolvidas entre a cinza da casca de arroz e a cal, bem como seus efeitos físicos sobre o solo, são semelhantes aos ocorridos entre a cal e os argilominerais dos solos argilosos. As vantagens do uso de CCA ao solo estão associadas às melhorias das propriedades mecânicas e físicas do mesmo.

Em pesquisas com o vidro moído (VM), Kohlrauchs (2018) encontrou um material altamente silicoso, e sua adição em solos apontou um aumento no ganho de resistência conforme a porcentagem de vidro moído adicionada. Em um solo argiloso, Castro *et. al.* (2019) relatam que houve melhoras nas propriedades físicas e químicas, uma vez que houve a diminuição da plasticidade do solo e o aumento significativo da densidade e da resistência ao cisalhamento, fazendo do vidro moído uma alternativa para estabilização granulométrica, enquanto contempla às questões ambientais. Consoli *et. al.* (2018) utilizou vidro moído e cal de carbureto para estabilização de uma areia de Osório, e afirmam que, ao serem misturados e compactados, podem ser usados como base e sub-base de pavimento, entre outras obras de terraplenagem.

2.4 Cinza da folha de bambu (CFB)

O bambu é considerado um recurso natural com inúmeras finalidades e de rápido crescimento. Ele é bastante usado como produto alimentício e em diversas aplicações na construção civil. Algumas partes desta planta são inutilizadas e por isso são descartadas, sendo uma delas a sua folha. Com fins de descarte, essa folha é queimada em aterros, gerando a cinza da folha de bambu, considerada um material sem finalidade adequada, tornando-a uma fonte poluente (SCURLOCK; DAYTON; HAMES, 2000).

Entretanto, pesquisas como a de Villar-Cociña et al. (2010) vêm sendo realizadas com intuito de tornar esse resíduo das folhas uma alternativa sustentável. A fim de caracterizar essa cinza, o autor realizou a queima das folhas em uma mufla, a uma temperatura de calcinação de 600 °C durante o período de 2 horas, e após a queima, fez a composição química da cinza através da técnica de fluorescência de raio-X (FRX), revelando uma taxa de 80,4% sílica (SiO_2). Na composição mineralógica, realizada através do difratômetro de raio-X (DRX), a cinza mostrou uma natureza fortemente amorfa, não sendo detectada a presença de minerais cristalinos. Ainda, a forma da cinza da folha de bambu mostrou-se semelhante a da sílica ativa, usada normalmente na fabricação de concretos de alto desempenho.

Ainda, Villar-Cociña et al. (2016) utilizou diferentes temperaturas de calcinação para avaliar suas influências nas propriedades pozolânicas da CFB. A produção de cinzas foi através da mufla à uma temperatura de 500°C, 600°C e 700°C, por um tempo de 2 horas, e uma taxa de aquecimento de 10°C/min, avaliadas posteriormente através de condutividade elétrica e aplicação de modelos matemáticos para determinar os parâmetros cinéticos. O resultado foi que a cinza calcinada à temperatura de 500°C foi a que apresentou maior reatividades, seguido pela cinza calcinada a 600°C e 700°C.

Outra pesquisa feita por Moraes (2019), utilizou um forno sem temperatura controlada para produzir a cinza da folha de bambu, sendo monitorada apenas por sensores de temperatura (termopares), desenvolvido pelo grupo de pesquisa MAC - Materiais Alternativos de Construção. O resultados das análises da cinza revelaram seu alto teor de sílica (74,23%), sendo 92,33% desse óxido uma sílica amorfa, e uma perda ao fogo de 11,34% de matéria orgânica. Neste caso, a cinza apresentou picos de quartzo em 7,67% de sílica cristalina em relação a sílica total, devido à contaminação do solo no material, devido sua coleta ser diretamente do chão.

A produção da cinza para Frías et al. (2012) foi semelhante a de Villar-Cociña et al. (2010), sendo obtida através de queima controlada em forno elétrico a 600°C, apresentando um teor de sílica de 78,7% e uma natureza amorfa. Para avaliar sua atividade pozolânica, o autor usou o método de aceleração químico, que consiste em colocar 1 grama de cinza da folha de bambu em uma solução de cal saturada (75 mL), a 40 °C, por 1, 7, 28, 90 e 360 dias,

analisando a concentração de CaO ao final de cada período. A concentração de CaO (mmol/l) foi obtida a partir da diferença entre a concentração da solução controle de cal saturada (17,68 mmol/l) e a concentração de CaO na solução que continha a amostra de cinza.

A CFB consumiu, em 6 horas, 50% dessa cal, e em 3 dias, 90%. Após esse período ela se estabilizou, mostrando uma elevada reatividade nas primeiras 24 horas, comparando-se a outras pozolanas altamente reativas, dentre elas, a sílica ativa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para esta pesquisa, enfatizando suas características e os métodos de caracterização empregados para os mesmos. Também, é descrito o programa experimental, com definições quanto ao método de dosagem e os ensaios para avaliar as amostras moldadas em laboratório.

3.1 Materiais

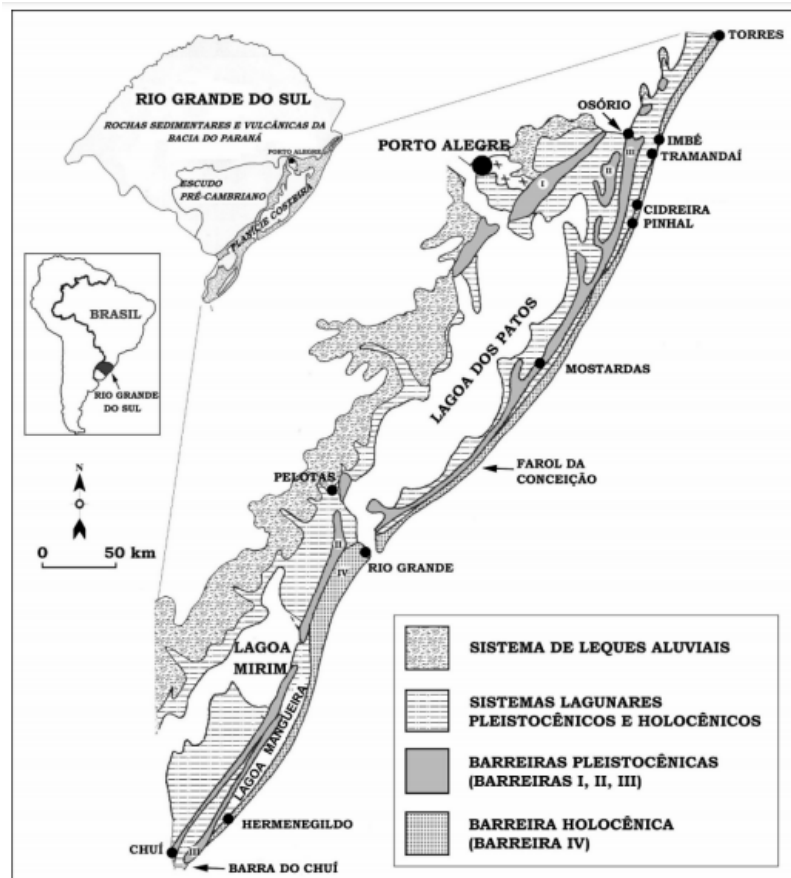
Nesta pesquisa, os materiais utilizados - areia de Osório, cinza da folha de bambu (CFB) e cal de carbureto - foram caracterizados através de ensaios específicos detalhados ao longo deste capítulo, a fim de registrar dados importantes para conhecimento desta e de futuras pesquisas. Em principal, a análise característica da cinza da folha de bambu avaliou seu nível de reatividade, determinante para reconhecê-la como um material pozolânico.

3.1.1 Areia de Osório

O solo escolhido para este trabalho é uma areia fina proveniente do município de Osório-RS-Brasil. Conforme seu âmbito geológico, esta areia, oriunda do sistema lagunar Barreira III, com extensão de Torres ao Chuí, conforme apresentado na Figura 1, possui uma caracterização quartzosa, fina, clara e bem selecionada. Esse solo se correlaciona aos depósitos de arenosos marinhos referidos em outros pontos do litoral brasileiro e em regiões costeiras pelo mundo (TOMAZELLI; WILLWOCK, 2000). A Figura 2 apresenta a

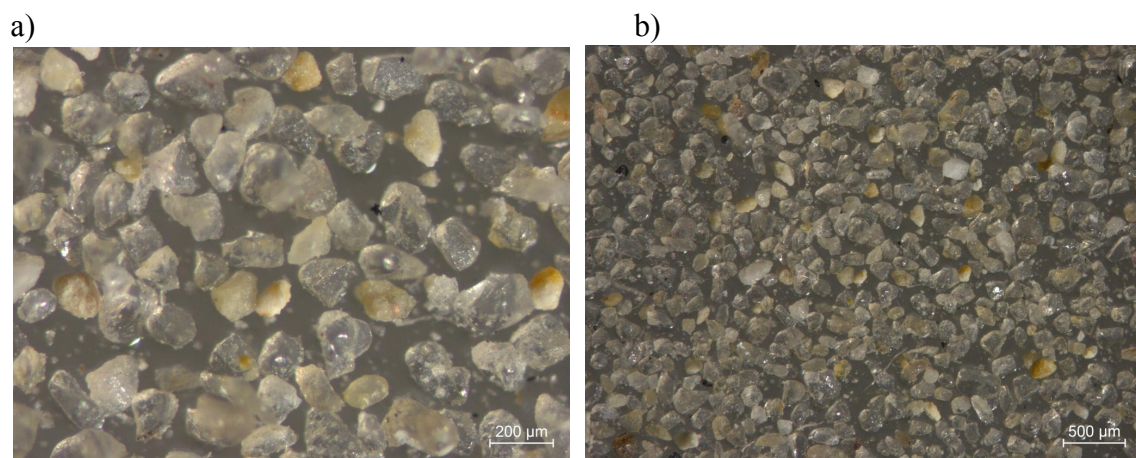
microscopia ótica da areia de Osório. Na análise é possível visualizar o formato arredondado dos grãos, de tamanho uniforme e rugosidade moderada.

Figura 1: Localização do município de Osório e mapa geológico simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul



Fonte: Tomazelli; Villwock (2000).

Figura 2: Microscopia da areia de Osório - escala 200 μm e 500 μm



Fonte: Leon (2018).

3.1.2 Cinza da folha de bambu

A cinza da folha de bambu é um material fino, produzido através da queima das referidas folhas em temperatura e tempo controlados. As folhas utilizadas para a produção da cinza foram colhidas no campus da Universidade do Vale do Taquari - Univates, na cidade de Lajeado, Rio Grande do Sul, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Folhas de bambu secas



Fonte: da autora (2020).

3.1.2.1 Produção da cinza da folha de bambu (CFB)

Após colhidas, as folhas foram colocadas na estufa (em 115 °C) por um determinado tempo (entre 15 e 20 minutos) para que houvesse eliminação total da umidade ainda presente. Depois de secas, essas folhas foram trituradas em liquidificadores e armazenadas. A Figura 4 mostra as folhas na condição de trituradas.

Para cada queima, utilizou-se a quantidade de 125 gramas de folha triturada. A temperatura de calcinação em 500 °C, por um período de 3 horas, foram definidos através do ensaio de termogravimetria, conforme explicado no item 3.2.6. As folhas trituradas foram inseridas na mufla, modelo JUNG 96.120, localizada no Laboratório da Engenharia Mecânica da Univates, conforme visto na Figura 5. Para acomodação das folhas trituradas, optou-se pelo uso de tijolos refratários devido a sua resistência a altas temperaturas e para manter a

cinza isolada de possíveis contaminações por fragmentos de outros materiais que a mufla pudesse conter.

Figura 4 - Folhas de bambu trituradas



Fonte: da autora (2020).

Figura 5 - Preparação da mufla com as folhas trituradas



Fonte: da autora (2020).

A mufla foi programada para estabilizar na temperatura solicitada, com velocidade de aquecimento de 10°C /min, e desligar-se assim que o tempo determinado fosse esgotado. Assim que ocorreu a interrupção do processo, a mufla foi imediatamente aberta para que a cinza sofresse choque térmico, a fim de que, de fato, ela criasse uma condição amorfa. A Figura 6 mostra a cinza logo após a queima. Caso a mufla não seja aberta de imediato, a cinza pode continuar queimando devido à alta temperatura, podendo levar à cristalização e a perda

das propriedades requeridas. Nessas condições, a cinza fica escurecida, conforme mostra a Figura 7 e, dessa forma, o lote fica inapto para sua utilização, por isso deve ser descartado.

Vale lembrar que existem muflas de variados tamanhos e a quantidade de folha triturada a ser colocada nela irá depender dessa capacidade. De certa forma, para que haja uma queima uniforme e completa, as folhas precisam ser dispostas em camadas bem finas.

Figura 6 - Cinza da folha de bambu em seu estado natural



Fonte: da autora (2020).

Figura 7 - Cinza inapta devido ao excesso de queima



Fonte: da autora (2020).

3.1.2.2 Beneficiamento da cinza da folha de bambu

Obtida a cinza, fez-se necessária a sua moagem, e para isso foi utilizado o moinho de bolas, conforme mostra a Figura 8. Esse equipamento cilíndrico horizontal é movido a motor em baixa velocidade. Enquanto gira, ocorre o cascadeamento das esferas que atiram com o material inserido, e as ações de cisalhamento e choque ocasionam a redução da granulometria do material. Então, para a moagem da cinza da folha de bambu, foram utilizadas 600 gramas do material natural e 6 kg de bolas, em 10.000 voltas a uma frequência de 90 hertz.

Figura 8 - Moinho de bolas



Fonte: da autora (2020).

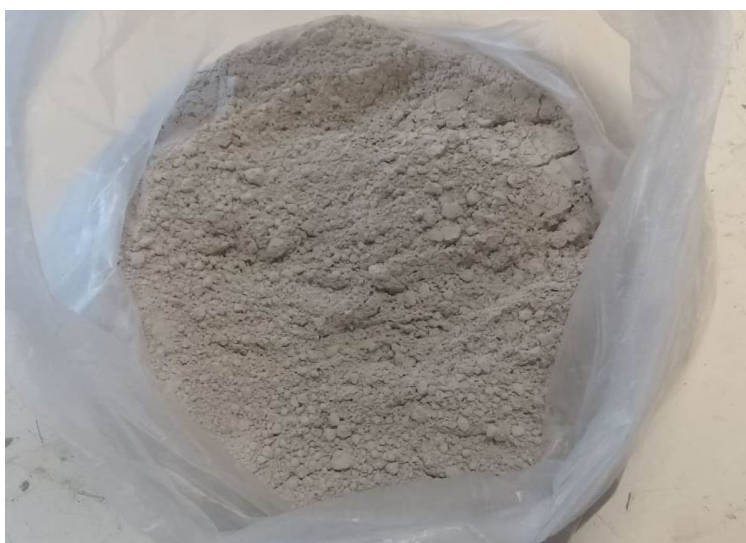
Depois de moída, a cinza foi peneirada na peneira nº 200 (0,075 mm), conforme mostra a Figura 9, a fim de separar as impurezas e os grãos maiores ainda existentes, sobrando assim o material fino passante (FIGURA 10). Por fim, a cinza foi pesada e armazenada em local seco e livre de impurezas, estando assim pronta para ser utilizada.

Figura 9 - Processo de peneiramento da cinza da folha de bambu



Fonte: da autora (2020).

Figura 10 - Cinza da folha de bambu pronta



Fonte: da autora (2020).

3.1.3 Cal de carbureto

A cal de carbureto utilizada neste estudo é um resíduo proveniente do processo produtivo do gás acetileno de uma indústria localizada em Sapucaia do Sul-RS. Scheuermann Filho (2019) explica que essa cal possui características químicas e físicas favoráveis, podendo

ser, de fato, reciclada e empregada na engenharia geotécnica, visando a estabilização de solos. A Figura 11 mostra o aspecto físico da cal de carbureto.

Segundo Saldanha (2014) essa cal apresenta uma boa afinidade com silicatos e aluminatos no desenvolvimento das reações pozolânicas. Dessa forma, é esperado que, em conjunto com a cinza da folha de bambu, essa cal desenvolva resistências significativas ao final deste estudo.

Figura 11 - Cal de carbureto



Fonte: da autora (2020).

3.2 Caracterização dos materiais

Neste item são apresentados os ensaios de caracterização da areia de Osório, da cinza da folha de bambu e da cal de carbureto. O Quadro 2 apresenta os ensaios determinados para cada material. Na sequência, esses métodos são descritos, mostrando ao final de cada um os resultados obtidos para os respectivos materiais.

Quadro 2 - Ensaios de caracterização dos materiais

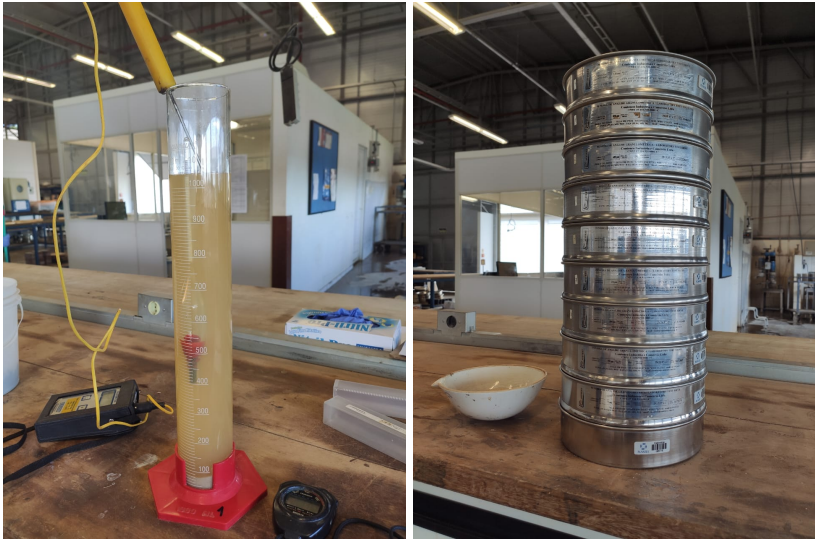
Tipo de Ensaio	Material	Norma
Granulometria	Areia de Osório	<ul style="list-style-type: none"> • Peneiramento e sedimentação - NBR 7181 (ABNT, 2016) • Difração à laser
	Cinza da folha de bambu	Difração à laser
	Cal de carbureto	Difração à laser
Classificação do solo	Areia de Osório	AASHTO - D3282-15 (ASTM, 2015)
		SUCS - D2487-17 (ASTM, 2017)
índice de vazios (emín / emáx)	Areia de Osório	emín → NBR 16843 (ABNT, 2020) emáx → NBR 16840 (ABNT, 2020)
Massa específica	Areia de Osório	NBR 6458 (ABNT, 2016)
	Cinza da folha de bambu	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Cal de carbureto	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Termogravimetria (TGA e DTG)	Cinza da folha de bambu	-
Área específica (BET)	Cinza da folha de bambu	-
	Cal de carbureto	-
Fluorescência de raios-X (FRX)	Cinza da folha de bambu	-
	Cal de carbureto	-
Difração de raios-X (DRX)	Cinza da folha de bambu	-
	Cal de carbureto	-
Classificação pozolânica	Cinza da folha de bambu	NBR 12653 (ABNT, 2014)
Método Chapelle modificado	Cinza da folha de bambu	NBR 15895 (ABNT, 2010)

Fonte: da autora (2020).

3.2.1 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

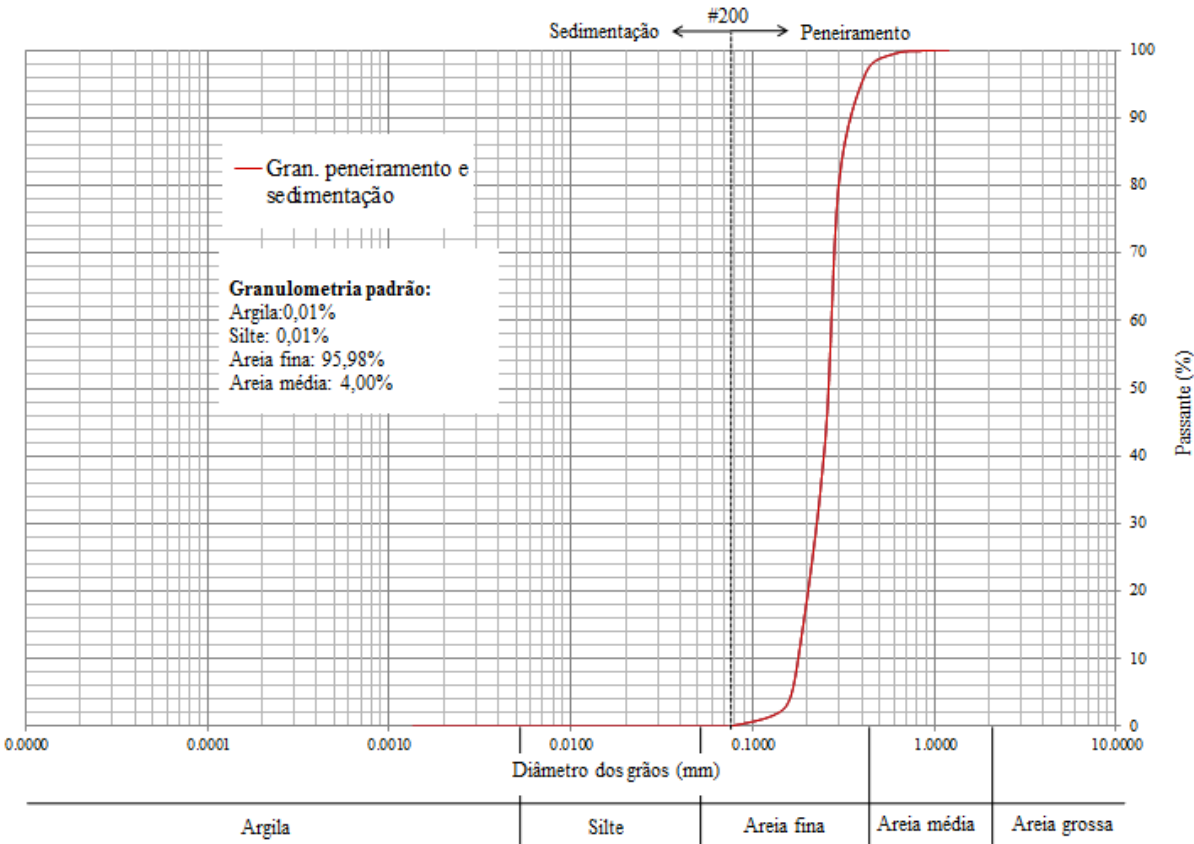
O ensaio de granulometria é padronizado pela NBR 7181 (ABNT, 2016c), e estabelece o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento, como é o caso da areia estudada. A amostra foi preparada de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a). Inicialmente, realizou-se o ensaio de sedimentação, utilizando-se 120 gramas do material passado na peneira de 2,0 mm. Para o ensaio de peneiramento fino, o material precisou ser lavado na peneira de 0,075 mm, e após, secado na estufa por 24 horas para então realizar o ensaio. A Figura 12 mostra os ensaios de sedimentação e peneiramento. A Figura 13 mostra o resultado da curva granulométrica da areia de Osório, demonstrando que a mesma é uma areia de granulometria fina (95,98 %).

Figura 12 - Ensaio de sedimentação e peneiramento fino da areia de Osório



Fonte: da autora (2020)

Figura 13 - Curva de sedimentação e peneiramento fino da areia de Osório



Fonte: da autora (2020).

3.2.2 Análise granulométrica a laser

O ensaio de granulometria, realizado pela distribuição de tamanho de partícula por difração de LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), utiliza um aparelho de alta resolução que viabiliza avaliar tamanhos de partículas menores do que permite o método por peneiramento, o que justificativa sua utilização nesta pesquisa, pois os grãos da cal de carbureto e da cinza da folha de bambu são bastante finos.

Optou-se, também, por usar o método para a areia, a fim de averiguar se há grande diferença comparado ao resultado obtido no ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento fino. Os dados do equipamento são: Analisador CILAS, Particle Size Analyser, modelo CILAS 1180 Liquid (CILAS, Orleans, França). Faixa de análise: 0,04 μm a 2500 μm , estando disponibilizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), Escola de Engenharia de Materiais – UFRGS).

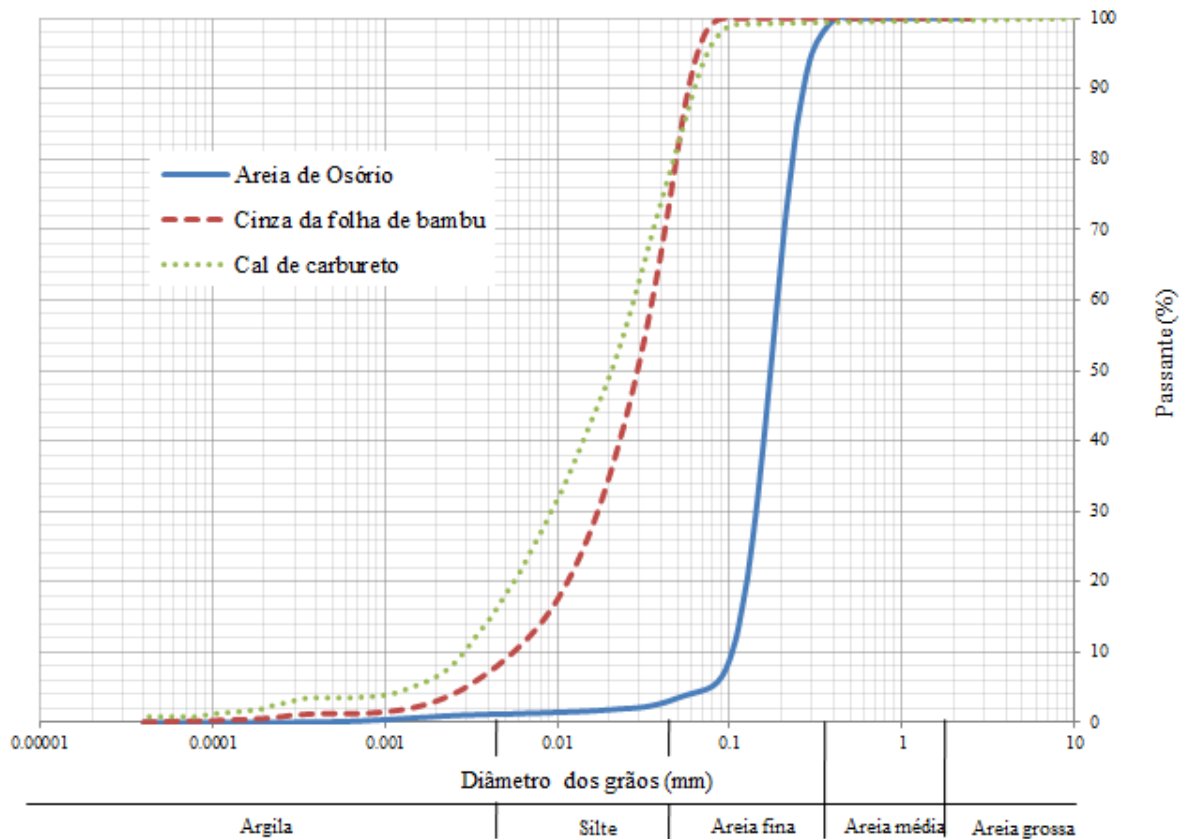
As curvas de distribuição granulométrica da areia, da cal e da cinza são apresentadas na Figura 14. A partir da análise, determinou-se a granulometria dos materiais, conforme mostrado na Tabela 6, que define a areia de Osório como uma areia de granulometria fina (96,20%), a cinza da folha de bambu como um material siltoso (72%), e a cal de carbureto também como um material siltoso (64%).

Tabela 6 - Análise granulométrica dos materiais

Característica	Areia de Osório	Cinza da folha de bambu	Cal de carbureto
% Argila ($d < 0,005 \text{ mm}$)	1,80	9,00	18,00
% Silte ($0,005 < d < 0,05 \text{ mm}$)	2,00	72,00	64,00
% de Areia fina ($0,05 < d < 0,42 \text{ mm}$)	96,20	19,00	17,40
% de Areia média ($0,42 < d < 2 \text{ mm}$)	-	-	0,40
% de Areia grossa ($2 < d < 4,8 \text{ mm}$)	-	-	0,20

Fonte: da autora (2020).

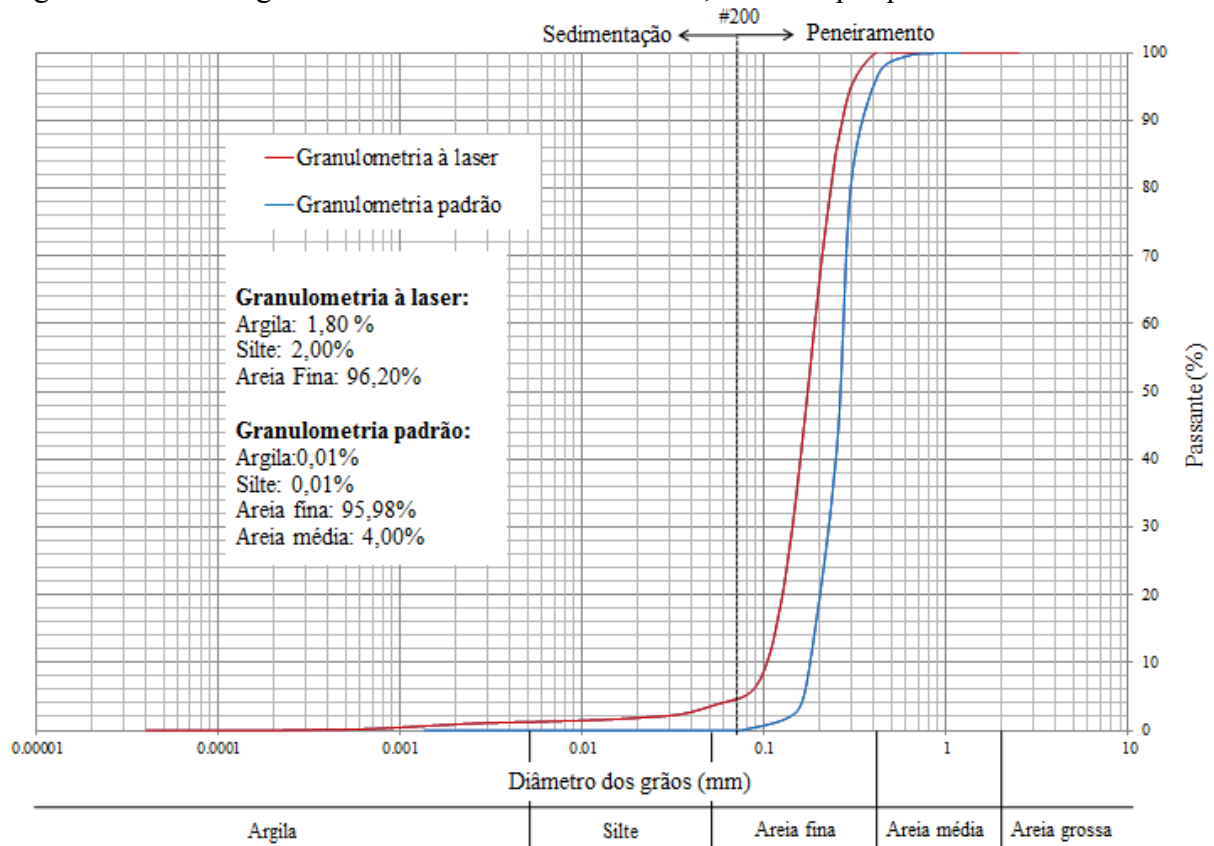
Figura 14 - Curvas granulométricas dos materiais pelo ensaio de difração à laser



Fonte: da autora (2020).

A comparação entre os ensaios de granulometria por peneiramento e a laser, para a areia de Osório, é analisada no gráfico da Figura 15. As mínimas divergências dos resultados ocorrem devido a precisão dos métodos. Assim, se conclui que a areia de Osório possui uma granulometria fina, em torno de 96,00 %.

Figura 15 - Curvas granulométricas da areia de Osório, métodos por peneiramento e à laser



Fonte: da autora (2020).

3.2.3 Classificação do solo (AASHTO e SUCS)

A composição granulométrica dos solos pode apresentar variados níveis de partículas dos grãos. Sendo assim, para classificá-los, é comumente utilizado o sistema de classificação americano, o *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), através da norma americana D3282 (ASTM, 2015). O estudo é baseado na granulometria do solo, através da curva granulométrica e, seguindo as etapas da Tabela 7, é possível definir a classificação do solo. Portanto, o resultado de classificação do solo, de acordo com as análises apresentadas, pôde ser classificado como A-3 pelo Sistema Rodoviário de Classificação (ASTM, 2015).

Tabela 7 - Classificação dos solos - AASHTO

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltsos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Granulometria - % que passa:												
Nº 10	50 máx.											
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.									
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40												
Limite de Liquidez - LL (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	41 mín.
Índice de Plasticidade - IP (%)	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia siltosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos		

Fonte: Adaptado pela autora com base na D2487-17 (ASTM, 2017a).

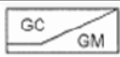
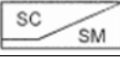
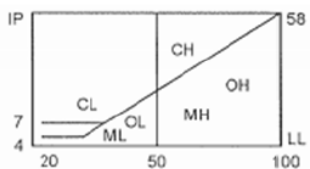
Ainda, outro sistema muito utilizado para classificar um solo é o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), versão desenvolvida pela *American Society For Testing and Materials* (ASTM). Com base na granulometria obtida através da curva, foi identificada a fração granulométrica predominante. Através da norma americana D2487 (ASTM, 2017a) – SUCS, identificou-se o solo pelo conjunto de duas letras, conforme apresentado no Quadro 3. Após identificar o solo (neste estudo, como uma areia - S), definiu-se a característica secundária. A classificação do solo pelo método SUCS é definida a partir da Tabela 8.

Quadro 3 - Classificação dos solos - SUCS

Característica principal	G	Pedregulho	Característica secundária	W	Bem graduado
	S	Areia		P	Mal graduado
	M	Silte		H	Alta compressibilidade
	C	Argila		L	Baixa compressibilidade
	O	Solo orgânico			
				Pt	Turfas

Fonte: Adaptado pela autora com base em Pinto (2006).

Tabela 8 - Classificação do solo - SUCS

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	GC
		GM	
	5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
% P #200 > 12		SC	
SM			
5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.		
% P #200 > 50	C	CL	
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

Fonte: Adaptado pela autora com base em Pinto (2006).

Portanto, o resultado de classificação do solo pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (ASTM, 2017a) de acordo com as análises apresentadas, é de uma areia SP, podendo ser chamada de areia fina mal graduada.

3.2.4 Índice de vazios mínimo e máximo

Para a determinação dos índices de vazios, utilizou-se como base as normas brasileiras NBR 16843 (ABNT, 2020b) para índice de vazios mínimo de solos não-coesivos e a NBR 16840 (ABNT, 2020a) para índice de vazios máximo de solos não-coesivos. Para a areia de Osório, foram determinados os valores de 0,60 para o índice de vazios mínimo, e 0,90 para o índice de vazios máximo.

3.2.5 Massa específica dos grãos

A massa específica dos grãos para a areia de Osório é definida de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016b), e para a cinza da folha de bambu e para a cal de carbureto, pela NBR 16605 (ABNT, 2017a). O resultado obtido de massa específica para a areia de Osório, foi de 2,65 g/cm³. Para a cal de carbureto, foi determinada uma massa específica de 2,12 g/cm³, e para a cinza da folha de bambu, o valor de 2,05 g/cm³.

3.2.6 Termogravimetria (TGA)

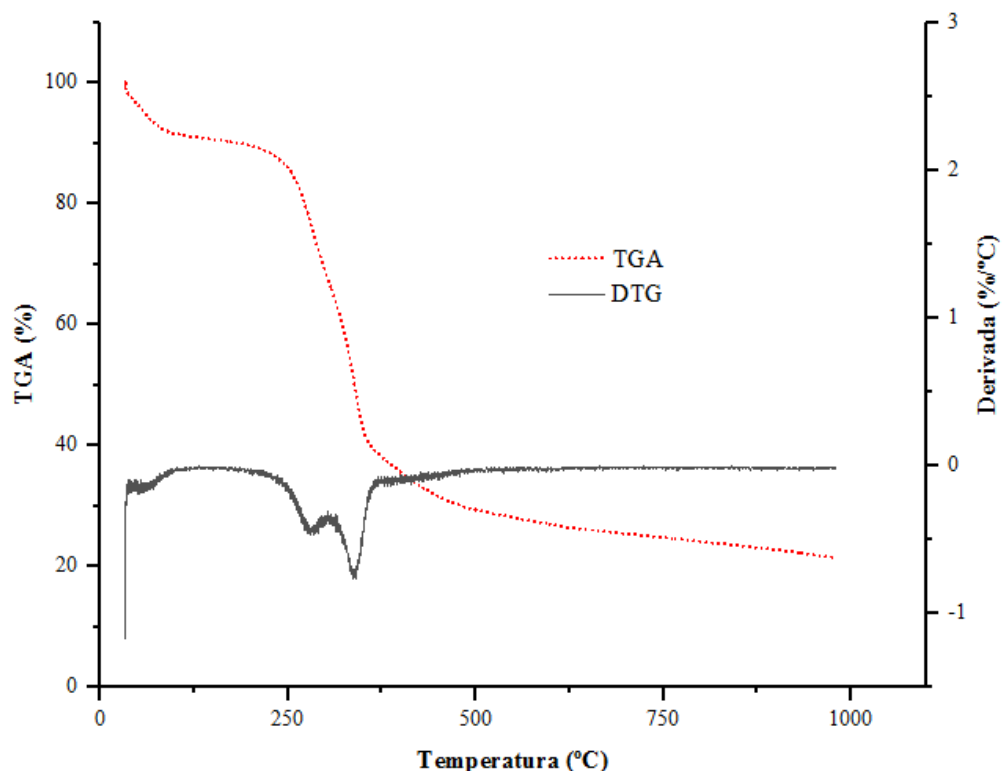
A análise Termogravimétrica (TGA), avalia a variação de massa da amostra em função da temperatura e do tempo. O equipamento utilizado para a análise foi o TGA 4000 V1.04, onde a amostra foi aquecida à uma temperatura entre 35 e 1000°C, com velocidade de aquecimento de 10°C /min, em uma atmosfera de nitrogênio (N_2) com fluxo contínuo de gás de 75 ml.min⁻¹ e pressão ambiente.

A partir dos resultados obtidos da análise da folha de bambu, se obteve a curva de TGA, e a derivada DTG, conforme mostra a Figura 16. Segundo Alias et al. (2014), o ensaio de TG para biomassa ocorre conforme as fases descritas a seguir:

- a) Fase 1: secagem e evaporação de componentes leves ($T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- b) Fase 2: volatilização/queima propriamente dita ($150\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 450\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- c) Fase 3: volatilização da lignina ($T > 450\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Constata-se, então, que em aproximadamente 450°C ocorre a interrupção da variação de energia do sistema. Acredita-se que neste ponto já houve a queima total da matéria orgânica existente (pigmentos, lignina e celulose), restando principalmente a sílica e algumas impurezas. Dessa forma, adotou-se a temperatura de 500°C para este estudo, embora acredita-se que diferentes temperaturas devam vir a ser estudadas em outras pesquisas.

Figura 16 - Análise termogravimétrica da CFB



Fonte: da autora (2020).

3.2.7 Área superficial específica (BET)

A determinação da área superficial específica em partículas sólidas, é usualmente obtida pelo método desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller, comumente conhecido como BET. Entende-se que, quanto mais fino for o material, maior será sua área específica, levando à maior reatividade. Para a cal de carbureto, determinou-se uma área superficial específica de 22,6 m²/g, e para a cinza da folha de bambu, uma área superficial específica de 66,93 m²/g.

3.2.8 Fluorescência de raios-X (FRX)

Para a caracterização química dos materiais, realizou-se o ensaio de fluorescência de raios-X (FRX). Este método permitiu identificar a composição química do material (análise qualitativa), além de estabelecer a proporção de cada elemento (análise quantitativa) presente

na amostra. A Tabela 9 mostra a composição química da cinza da folha de bambu e da cal de carbureto.

Tabela 9 - Composição química da cinza da folha de bambu e da cal de carbureto

Óxido	Cinza da folha de bambu (%)	Óxido	Cal de carbureto (%)
SiO ₂	76,00	CaO	74,00
CaO	15,61	SiO ₂	3,10
P ₂ O ₅	2,94	Al ₂ O ₃	0,46
Al ₂ O ₃	2,36	Fe ₂ O ₃	0,26
Fe ₂ O ₃	1,42	MgO	0,72
MgO	1,23	SO ₃	0,54
MnO	0,44	LOI*	20,9
		* LOI = loss on ignition (perda ao fogo)	

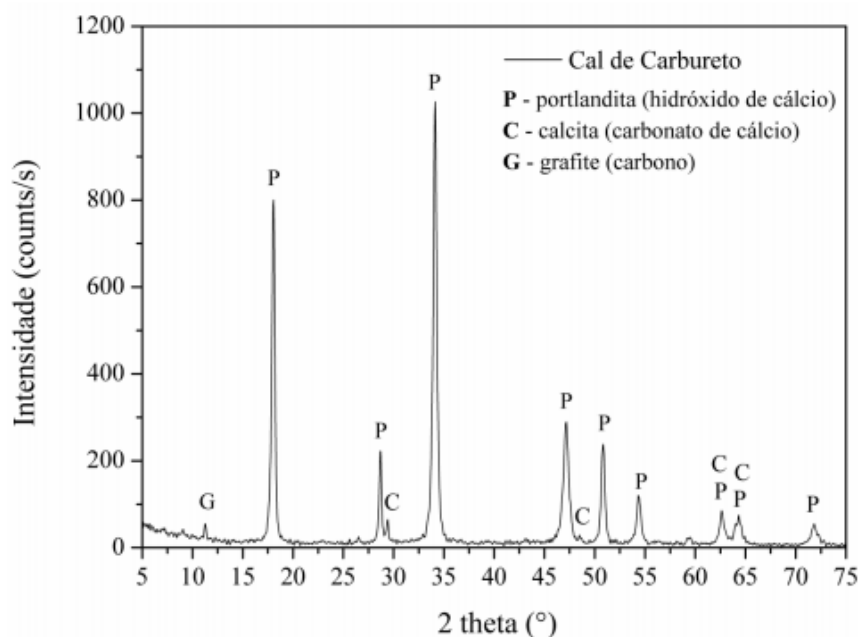
Fonte: da autora (2020).

Para a cinza da folha de bambu, a análise da composição química no ensaio de FRX resultou majoritariamente em sílica (SiO₂), totalizando 76% do óxido. Para a cal de carbureto, a composição química é basicamente formada óxido de cálcio (CaO), em um total de 74%.

3.2.9 Difração de raios-X (DRX)

No ensaio de difração de raios-X (DRX), foi possível determinar de forma qualitativa as fases cristalinas existentes na amostra. Sendo assim, para a cal de carbureto, o ensaio de difração de raios-X executado por Scheuermann Filho (2019) é mostrado na Figura 17. O resultado dessa análise mostra a presença majoritária do mineral portlandita, correspondente à fase cristalina do hidróxido de cálcio presente nesta cal. De forma minoritária, identificou-se a existência de calcita, procedente do processo de carbonatação do hidróxido de cálcio em contato ao ar. O traço de carbono existente é provável da produção de gás acetileno. Em análise semi-quantitativa, verifica-se que a cal de carbureto possui cerca de 96% de portlandita e apenas 4% de calcita.

Figura 17 - Difração de raios-X (DRX) da cal de carbureto



Fonte: Scheuermann Filho (2019).

Para a cinza da folha de bambu, foi constatado apenas um pequeno pico do mineral Calcita ($CaCO_3$) em $29,44^\circ$, como mostra a Figura 18, sendo possível explicar seu surgimento no momento em que a amostra, ao sair da mufla, entrou em contato com o gás carbônico no ar, ocorrendo assim a carbonatação e dando origem ao mineral. Porém, através do Método da Cristalinidade (EQUAÇÃO 13), calculado por meio da integral das curvas, pode-se estimar que o material produzido possui um alto grau de amorficidade (98%), evidenciando assim que a CFB tem grande potencial reativo, pois é amorfa. O grau de amorfismo, segundo Lana (2017), é um dos parâmetros que influenciam o grau de reatividade de uma pozolana. O grau de Calcita, por ser mínimo, não implica nesta reatividade.

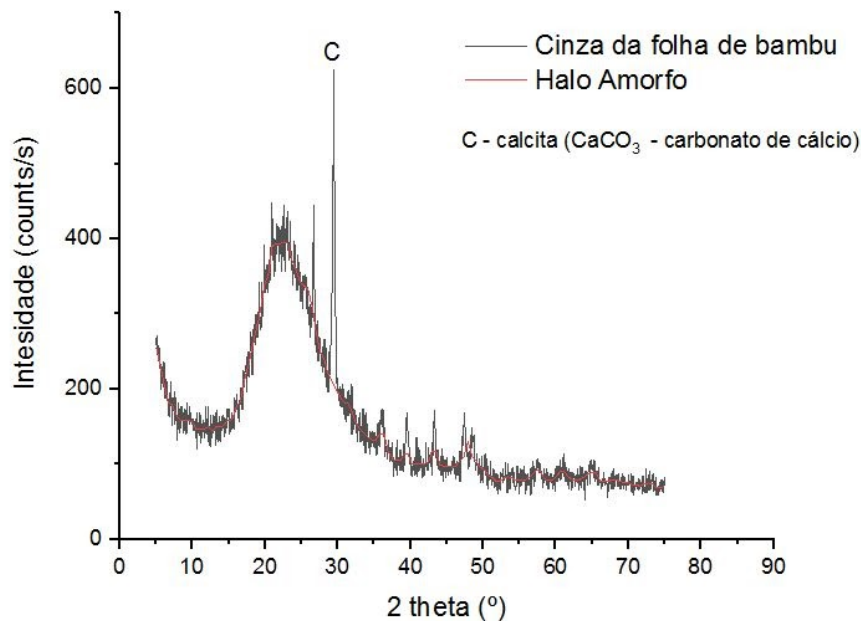
$$\%_A = 100 \left(1 - \frac{I_{DRX} - I_{HA}}{I_{HA}} \right) \quad (13)$$

Onde,

I_{DRX} , é a integral do resultado do DRX calculado ao longo do intervalo $5 - 75^\circ$ de 2θ ;

$I_{H.A}$, é a integral do resultado do halo amorfo calculado (background) ao longo do intervalo 5 - 75° de 2 theta.

Figura 18 - Difração de raios-X (DRX) da cinza da folha de bambu



Fonte: da autora (2020).

3.2.10 Classificação pozolânica

As pozolanas são classificadas de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015), através das seguintes classes:

- a) classe N: pozolanas naturais e artificiais, como alguns materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, terras diatomáceas, cherts silicosos e argilas calcinadas;
- b) classe C: cinzas volantes produzidas através da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas;
- c) classe E: quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C;

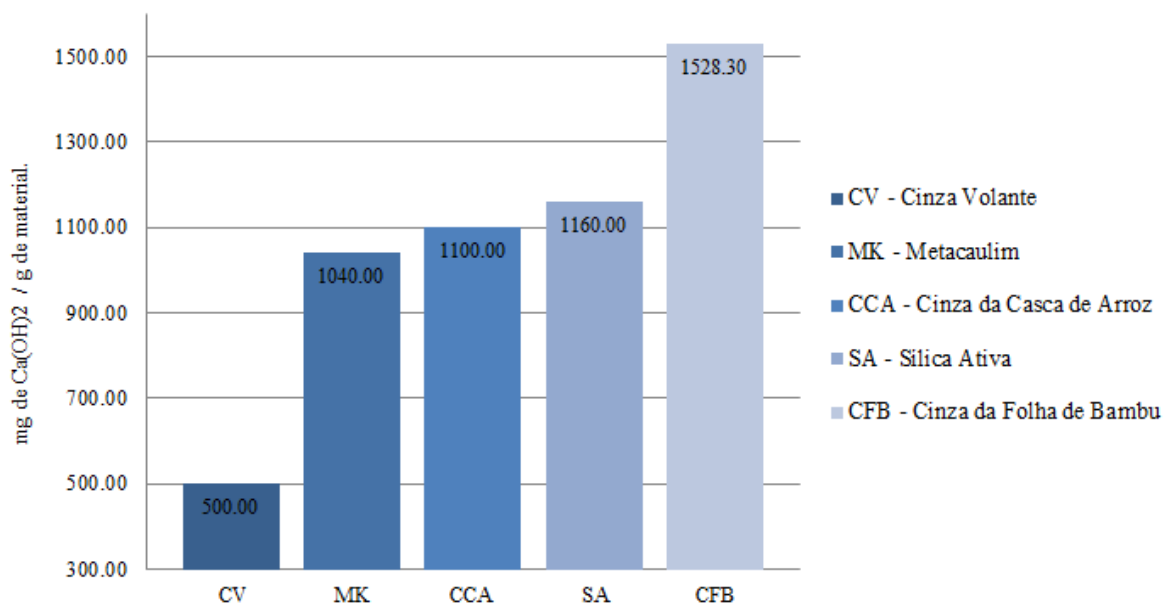
Classifica-se a cinza da folha de bambu como uma pozolana de classe N, por ser um material artificial, provido da calcinação, obtendo elevada porcentagem de sílica na sua composição.

3.2.11 Método Chapelle modificado

O ensaio de Chapelle modificado, ou método direto, determina a capacidade da pozolana em fixar a cal na formação dos compostos hidratados. Este método é definido pela NBR 15895 (ABNT, 2010). A resultante do ensaio, através da titulação encontrada, expressa a quantidade de hidróxido de cálcio fixado ($Ca(OH)_2$) por grama de material.

A cinza da folha de bambu resultou em 1.528,30 miligramas (mg) de $Ca(OH)_2$ por grama (g) de material. Em comparação a outros materiais citados por Quarcioni et al. (2015) na Figura 19, como a sílica ativa, que contém em torno de 1.160 mg; a cinza da casca de arroz em torno de 1.100 mg; o metacaulim aproximadamente 1.040 mg; e a cinza volante, com 500 mg de $Ca(OH)_2$ /g do material, pode-se perceber que a CFB produzida neste estudo possui uma excelente reatividade pozolânica, inclusive superando a reatividade de materiais pozolânicos clássicos utilizados, com resultado bastante superior ao dos materiais citados.

Figura 19 - Método de Chapelle modificado - comparação entre a CFB com outros materiais



Fonte: adaptado pela autora de Quarcioni et al. (2015).

3.3 Programa experimental

O embasamento desta pesquisa se dá pela metodologia de Projeto de Experimento (*Design of Experiments* - DoE), que se fundamenta fortemente em conceitos estatísticos, sendo destinada a otimização do planejamento, execução e análise de um experimento com objetivo de otimizar um sistema (RIBEIRO; CATEN, 2014). Essa ferramenta é utilizada para o aumento da produtividade, melhoria da qualidade de produtos e resolução de problemas (MENDES, 2006), tornando-se mais eficiente quando existe conhecimento do comportamento do processo em estudo (MONTGOMERY, 2009). Segundo Costa e Pereira (2007), a vantagem desta metodologia em relação ao método de tentativa e erro, é em ser formal e possuir custo reduzido, e permite analisar diversos fatores simultaneamente, visto que normalmente experimentos apresentam vários fatores. Para a determinação da influência desses fatores, uma das metodologias utilizadas para planejar e executar os experimentos é o projeto fatorial 2^k .

A partir deste planejamento, foram definidas as dosagens aplicadas às moldagens dos corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão simples (RCS) e de módulo cisalhante inicial (G_0).

3.3.1 Projeto Experimental Fatorial 2^k

O projeto fatorial 2^k , segundo Ribeiro e Caten (2014), são especialmente úteis nos estágios iniciais de uma pesquisa, em que muitos fatores são estudados ao mesmo tempo. Montgomery (2009) explica que entre as principais vantagens desse método estão a possibilidade de realizar a pesquisa com um número de ensaios reduzidos (2^k ensaios) e de variar inúmeros fatores de forma simultânea, permitindo assim uma análise da interação entre os mesmos. Também, a suposição de linearidade do método pode ser testada com o acréscimo de pontos centrais.

Dentro da análise, são determinadas as variáveis controláveis, que podem ser os fatores controlados e fatores mantidos constantes, e as variáveis não controláveis, que são fatores de ruídos ao longo da pesquisa (RIBEIRO; CATEN, 2014). A Tabela 10 apresenta as

variáveis definidas para essa pesquisa. Os fatores controlados são os parâmetros do processo estudados em vários níveis no experimento, como o peso específico aparente seco (γ_d) e o teor de cinza da folha de bambu (CFB). Já os fatores constantes são os parâmetros do processo que se mantêm permanentes ao longo do experimento, ou seja, o tipo de areia, o tipo e o teor da cal, o teor de umidade e o tempo de cura. Os fatores de ruído são variáveis que não podem ser controladas durante o processo e, conseqüentemente, são responsáveis pela parcela de erro experimental, como o operador, os equipamentos de medição e até mesmo o período do dia. As variáveis resposta analisadas neste estudo são a resistência à compressão simples (RCS) e o módulo cisalhante inicial (G_0) dos corpos de prova moldados. A fim de reduzir ao máximo o erro experimental e, por se tratar de poucas amostras, todos os corpos de prova que foram moldados pelo mesmo operador e em um único turno.

Tabela 10 - Variáveis controláveis e não controláveis

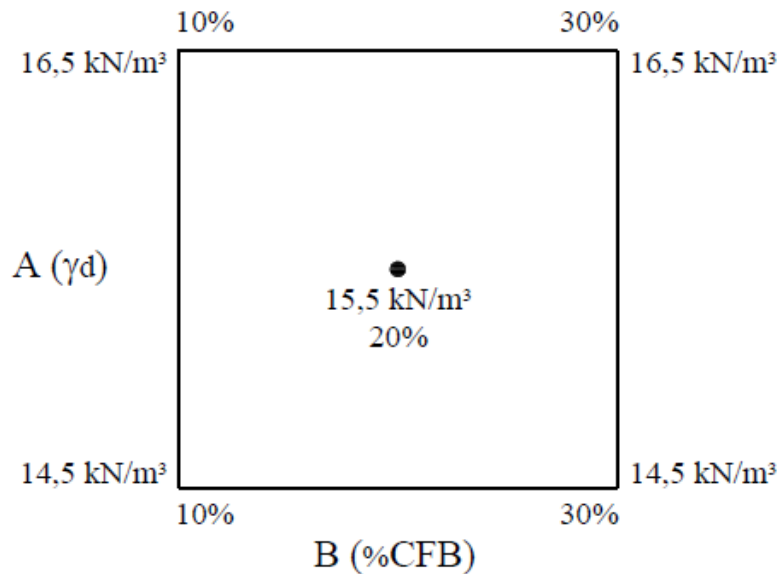
Fatores	Parâmetros do processo	Intervalos da pesquisa	
Controlados	Peso específico aparente seco (γ_d - kN/m ³)	14.5	16.5
	Teor de CFB (%)	10	30
Constantes	Teor de cal de carbureto (%)	5	
	Umidade (%)	14	
	Tipo de cura (°C - dias)	23° C - 28 dias	
	Tipo de solo	Areia de Osório	
	Tipo de cal	Cal de Carbureto	
Ruídos	Operador	-	
	Equipamentos de medição	-	
	Período do dia	-	

Fonte: da autora (2020).

Ainda, o método 2^k possibilita avaliar os efeitos de k fatores em dois níveis distintos, além de analisar os fatores relevantes que intervêm no comportamento de determinadas características a serem estudadas. O planejamento desta pesquisa procedeu por meio do fator experimental $2^2 + 1$ ponto central, ou seja, foram analisados dois fatores (A e B) em dois níveis cada (baixo e alto), onde A é o fator peso específico aparente seco (γ_d) nos níveis 14,5 kN/m³ e 16,5 kN/m³, e B é o fator teor de cinza da folha de bambu (CFB) em níveis 10% e 30%, ainda com a adição de um ponto central, com γ_d de 15,5 kN/m³ e CFB de 20%, conforme exemplificado na superfície do quadrado da Figura 20. Entende-se assim que cada vértice da figura geométrica representa um tratamento, podendo os níveis dos fatores serem mínimos e máximos, com a inclusão de um nível intermediário, testando assim, a linearidade

do método. Para cada dosagem foram moldados dois corpos de prova, ou seja, foram feitas em duplicatas.

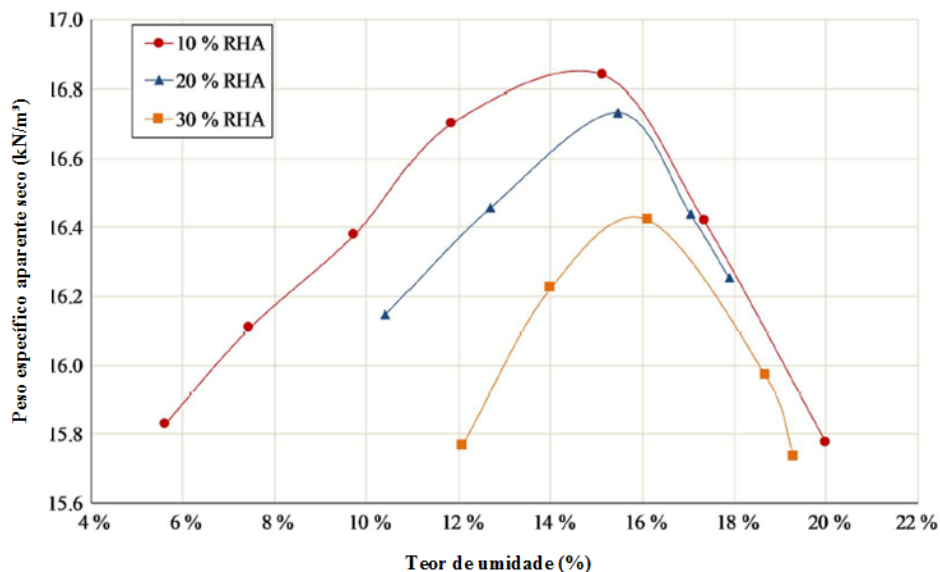
Figura 20 - Representação do experimento $2^2 + 1$ ponto central



Fonte: da autora (2020).

A definição dos pesos específicos aparentes secos (γ_d) - 14,5 kN/m³, 15,5 kN/m³ e 16,5 kN/m³ - e teor de umidade de 14%, foram feitas a partir da experiência encontrada nas literaturas de Leon et al. (2019), em que parte dos materiais utilizados são os mesmos: a areia de Osório e a cal de carbureto. Para a cinza da folha de bambu, foram definidos teores de 10%, 20% e 30% em relação a massa seca do solo arenoso, teores esses adotados das literaturas citadas, apesar da utilização de outro tipo de cinza. A Figura 21 apresenta o gráfico do ensaio de compactação Proctor para misturas de solo arenoso (areia de Osório), cal de carbureto e cinza da casca de arroz (*rice husk ash - RHA*).

Figura 21 - Gráfico de compactação Proctor, na experiência de Leon et al. (2019)



Fonte: adaptado pela autora de Leon et. al (2019).

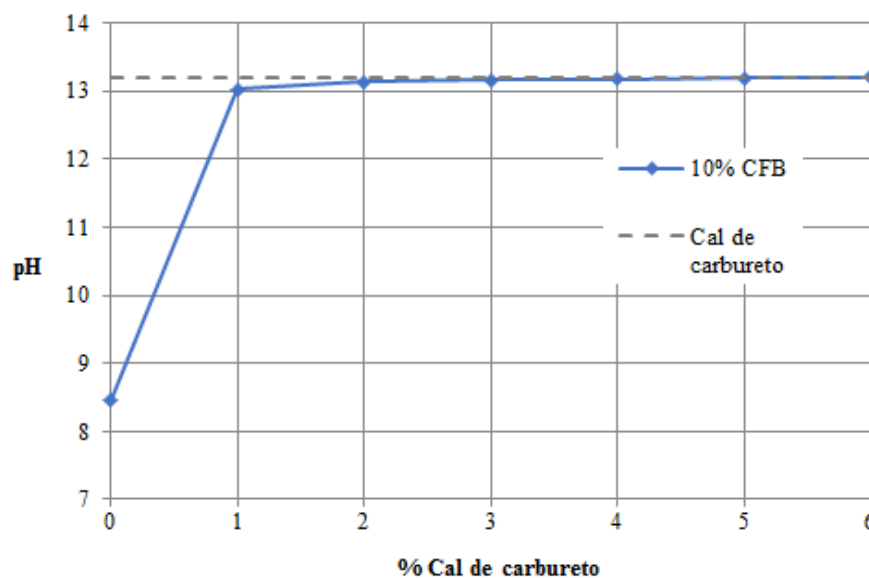
Para a cal de carbureto, foi definido o teor de 5%. Esse resultado foi obtido pelo método do pH, procedimento padronizado pela norma americana D6276 (ASTM, 2019). Ela é baseada no método de Eades e Grim, que define o teor mínimo da cal que, ao ser misturada ao solo, resulte em pH de 12,4 e mantenha esse aproximadamente constante. Foram realizados testes com dosagens fixas de 25g de areia de Osório e 10% de cinza da folha de bambu, com variações de 0 a 6% de cal de carbureto nas dosagens. A partir dos valores mostrados na Tabela 11 foi possível plotar o gráfico apresentado na Figura 22, onde se percebe que há uma estabilização do pH já nas primeiras dosagens. Desta forma, optou-se por utilizar o teor de 5% de cal de carbureto nas dosagens para a moldagem dos corpos de prova, em que o pH encontra-se em 13,19.

Tabela 11 - Resultados de pH para a cal de carbureto

% Cal de carbureto	pH
0	8.47
1	13.02
2	13.13
3	13.16
4	13.18
5	13.19
6	13.20
100% cal	13.19

Fonte: da autora (2020).

Figura 22 - Gráfico de determinação do pH para a cal de carbureto



Fonte: da autora (2020).

Então, seguindo o projeto experimental fatorial $2^2 + 1$ ponto central, com duplicatas, foram determinadas as dosagens dos materiais utilizados nos ensaios, conforme mostrados na Tabela 12. Ao todo, são 10 corpos de prova submetidos aos ensaios de pulso ultrassônico, que define o módulo cisalhante inicial (G_0), e de resistência à compressão simples (qu). Os resultados de G_0 e qu , foram correlacionados aos fatores controláveis e por meio de uma regressão linear executada no software de estatística Minitab 17.

Tabela 12 - Dosagens dos corpos de prova

CP	Tipo	γ_d (kN/cm ³)	CFB (%)	CC (%)	Umidade (%)	Tempo de cura
1	5x10 cm (2x)	14,5	10	5	14	28 dias
2	5x10 cm (2x)	16,5	10	5	14	28 dias
3	5x10 cm (2x)	14,5	30	5	14	28 dias
4	5x10 cm (2x)	16,5	30	5	14	28 dias
5	5x10 cm (2x)	15,5	20	5	14	28 dias

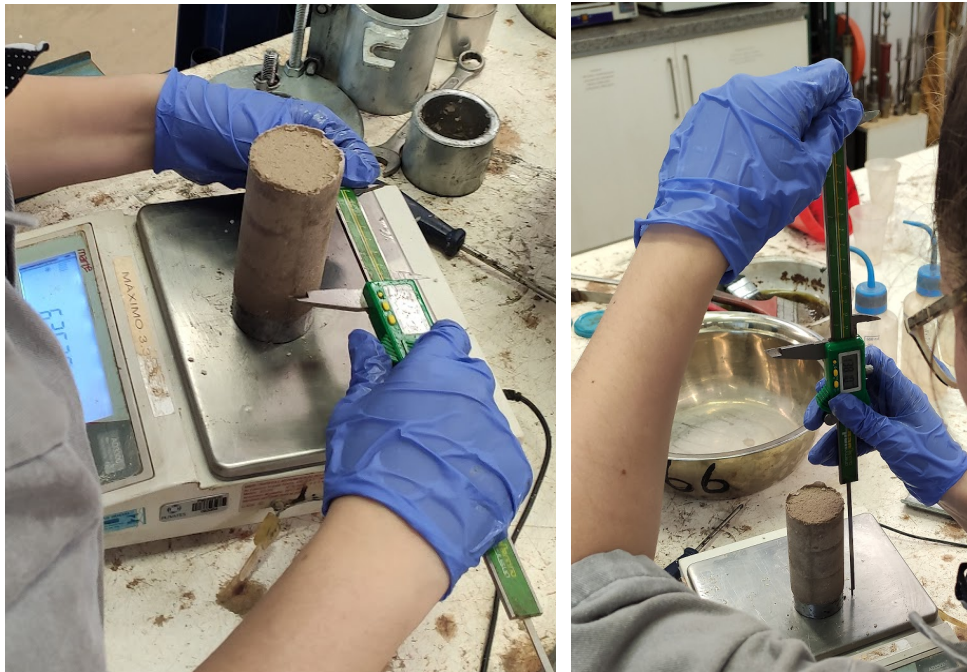
Fonte: da autora (2020).

3.3.2 Moldagem das amostras

Para o procedimento de moldagem dos corpos de prova, cumpriu-se as diretrizes da NBR 12024 (ABNT, 2012a), sendo utilizados os moldes cilíndricos tripartidos de 100 mm \pm

1 mm de altura e $50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diâmetro. A moldagem foi feita em três camadas, previamente homogeneizadas, escarificadas entre si e então compactadas por meio do método de compactação estática, sugerido por Ladd (1978). Por fim, os moldes foram removidos do corpo de prova, que tiveram seus pesos aferidos, assim como os diâmetros em cada centro de camada compactada e as alturas em três pontos, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 - Aferição das dimensões do corpo de prova



Fonte: da autora (2020).

Após conferência dos corpos de prova, aqueles que obedeceram aos critérios de aceitação seguiram para cura por 28 dias, a 23°C e umidade $\geq 95\%$. Para o teste, foram aceitas as amostras que atenderam às seguintes tolerâncias: peso específico aparente seco (γ_d) com variação dentro de $\pm 0,5 \text{ mm}$; diâmetro e altura, variando em até $\pm 1 \text{ mm}$. A Figura 24 mostra os corpos de prova recém moldados.

Figura 24 - Corpos de prova moldados



Fonte: da autora (2020).

A fim de reduzir os efeitos de sucção, que poderiam afetar os resultados de q_u e G_0 , as amostras foram imersas em água 24 horas antes da ruptura. Segundo Consoli et. al (2011b), esse procedimento garante um alto grau de saturação, reduzindo assim possíveis efeitos de sucção na resistência das amostras que devem ser rompidas em imediato após retiradas da água.

3.3.3 Parâmetro η/B_{iv}

A porosidade (η), de acordo com a Equação 14 (Consoli et al., 2011c), é uma função da massa específica da mistura (γ_d), dos teores de areia (A), cinza da folha de bambu (CFB) e cal de carbureto (CC) e das massa específicas da areia (γ_{S_A}), da cinza da folha de bambu ($\gamma_{S_{CFB}}$) e da cal de carbureto ($\gamma_{S_{CC}}$).

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left(\frac{\gamma_d}{\frac{A}{100} + \frac{CFB}{100} + \frac{CC}{100}} \right) \left(\frac{\frac{A}{100}}{\gamma_{S_A}} + \frac{\frac{CFB}{100}}{\gamma_{S_{CFB}}} + \frac{\frac{CC}{100}}{\gamma_{S_{CC}}} \right) \right\} \quad (14)$$

Para avaliar a influência da cinza da folha de bambu e da cal de carbureto com utilização de um único índice, o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}) é um parâmetro que representa a influência das somas destes teores nas propriedades da mistura. A Equação 15 mostra o cálculo deste índice com base na soma dos teores volumétricos da cinza da folha de bambu (V_{CFB}) e da cal de carbureto (V_{CC}) divididos pelo volume total da amostra (V).

$$B_{iv} = \frac{V_{CFB} + V_{CC}}{V} = \frac{m_{CFB}/\gamma_{SCFB} + m_{CC}/\gamma_{SCC}}{V} \quad (15)$$

A razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}) permite a determinação de um parâmetro de dosagem denominado porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, ou índice η/B_{iv} . Nesta pesquisa, esse índice visou quantificar a influência tanto da porosidade quanto dos materiais cimentantes em um único valor, sendo CFB + CC um novo material cimentício, feito a partir de material pozolânico (CFB) e um ativador (CC).

Ainda, o uso do η/B_{iv} permite estimar o comportamento das diferentes características da moldagem (três diferentes γ_d e três diferentes % de CFB) em apenas uma curva e uma equação. A Equação 16 rege a curva de dosagem, onde A, k e B são constantes de ajuste, considerando o máximo coeficiente de correlação (R^2) (LEON, 2018).

$$y = A \left[\frac{\eta}{(B_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (16)$$

Ainda, Leon (2018) explica que a influência da escalar k pode ser explicada da seguinte forma:

- a) se $k=1$: os parâmetros η e B_{iv} exercem uma influência de mesma magnitude, ou seja, variações proporcionais em ambos os parâmetros mantém o valor de qu e G_0 constantes;
- b) se $k>1$: o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}) exerce maior influência a qu e G_0 do que a porosidade, de forma que, um aumento na porosidade (η) pode ser compensado com um acréscimo proporcionalmente menor no teor de CFB, ou no teor de cal de carbureto, ou em ambos;
- c) se $k<1$: a porosidade (η) exerce maior influência a qu e G_0 do que o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}), de forma que, se houver um aumento na porosidade, o acréscimo no teor de CFB, ou de cal de carbureto, ou de ambos, seria proporcionalmente maior, compensando assim o aumento nos vazios devido a falta de compactação, mantendo a resistência constante.

Ainda, Diambra et al. (2017) comprovou em sua pesquisa que os valores de k e B , mostrados na Equação 16, dependem majoritariamente das características do solo, onde o valor de B (considerado para o autor como sendo $1/k$) aproxima-se do inverso de k , e a grandeza do escalar A é conduzida pelas propriedades conjuntas do solo e da matriz cimentícia.

3.3.4 Ensaio de pulso ultrassônico

Os testes ultrassônicos de velocidade de pulso são utilizados para avaliar as propriedades elásticas de solos cimentados artificialmente, de acordo com a norma americana ASTM D2845 (ASTM, 2008). Os transdutores são acoplados em ambas as extremidades da amostra com a utilização de um gel acoplador. Este procedimento permite a determinação do módulo cisalhante inicial (G_0) dos corpos de prova (EQUAÇÃO 17), sendo ρ a massa específica natural do corpo de prova e V_s a velocidade de onda cisalhante medida no ensaio, obtida pela relação entre a altura média de cada corpo de prova e o tempo aferido (SCHEUERMANN FILHO, 2019). A Figura 25 mostra o ensaio de ultrassom por ondas de compressão (p) e por ondas de cisalhamento (s), respectivamente.

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (17)$$

Figura 25 - Ensaio de ultrassom por ondas de compressão (p) e por ondas de cisalhamento (s)

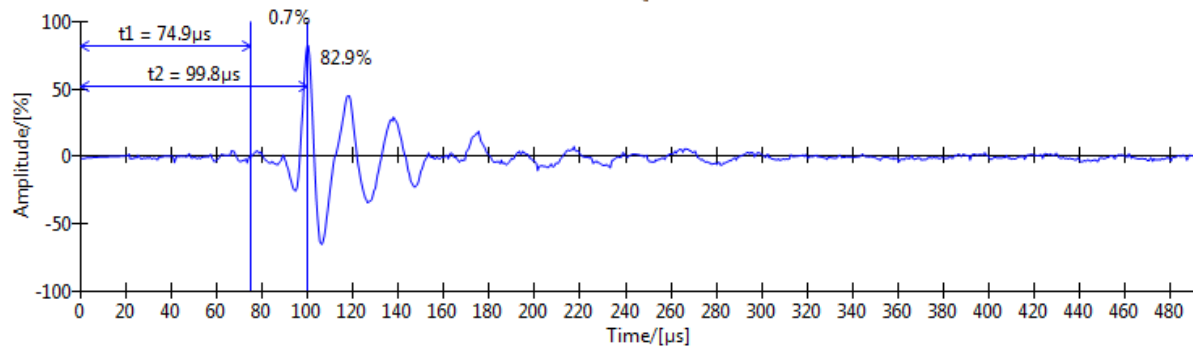


Fonte: da autora (2020).

A onda de compressão era induzida por meio da vibração de transdutores a uma frequência de 54 Hz, e a de cisalhamento pela vibração de outros tipos de transdutores a 250

Hz. O tempo de deslocamento da onda cisalhante (t_2) foi realizado na interface computacional do programa PundiT Lab. A Figura 26 apresenta o resultado do ensaio de pulso ultrassônico, notando-se a chegada da onda t_1 , tempo da onda de compressão, e em seguida a onda t_2 , relativa ao tempo da onda cisalhante, sendo t_2 superior ao t_1 .

Figura 26 - Propagação de onda cisalhante (t_2) no ensaio ultrassônico



Fonte: da autora (2020).

3.3.5 Ensaio de resistência à compressão simples (q_u)

Os procedimentos de ruptura do ensaio de resistência à compressão simples (q_u) foram feitos conforme a norma americana D1633 (ASTM, 2017b) e a norma brasileira NBR 12025 (ABNT, 2012b). Para esse ensaio foi utilizada uma prensa automática, aplicando as células de carga de 10 kN (1000 kg) e de 20 kN (2000 kg), a uma taxa constante de deslocamento de 1,14 mm/min.

O ensaio consistiu basicamente em colocar o corpo de prova sobre o prato inferior da prensa, de forma que o eixo vertical do corpo de prova estivesse alinhado ao eixo da rótula da máquina. A carga máxima alcançada foi registrada como a carga de ruptura do corpo de prova. A Figura 27 mostra a aplicação do ensaio de resistência à compressão simples em um dos corpos de prova depois de 28 dias de cura.

Figura 27 - Corpo de prova ensaiado à compressão simples



Fonte: da autora (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados de resistência à compressão simples (qu) e do módulo cisalhante inicial (G_0) das amostras ensaiadas, bem como as análises e discussões pertinentes à pesquisa. Primeiramente, são analisados os resultados qu e G_0 e suas relações com os seguintes fatores: peso específico aparente seco (γ_d) e teor de cinza da folha de bambu (CFB). Em seguida são realizadas as análises estatísticas dos resultados, e por fim a relação dos efeitos de porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}).

4.1 Resistência à Compressão Simples (qu)

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples (qu) obedecem aos parâmetros de moldagem, atendendo assim os critérios estabelecidos no programa experimental. Na Tabela 13 são descritos os corpos de prova ensaiados à compressão simples, submetidos à cura em 23°C por 28 dias. Também, são mostrados os resultados de resistência (qu) das amostras.

A areia de Osório, no estado puro, apresenta resistência apenas quando confinada. Na ausência de confinamento, essa resistência ao cisalhamento se anula. A partir dessa informação, torna-se possível comprovar a eficiência da estabilização química com a utilização da cinza da folha de bambu e a cal de carbureto, em termos de ganho de resistência mecânica. É importante destacar que tanto a cal, quanto a CFB, de forma individual, não reagem com a areia, sendo assim, toda a resistência encontrada foi ocasionada pela ligação entre os grãos, provenientes da reação pozolânica.

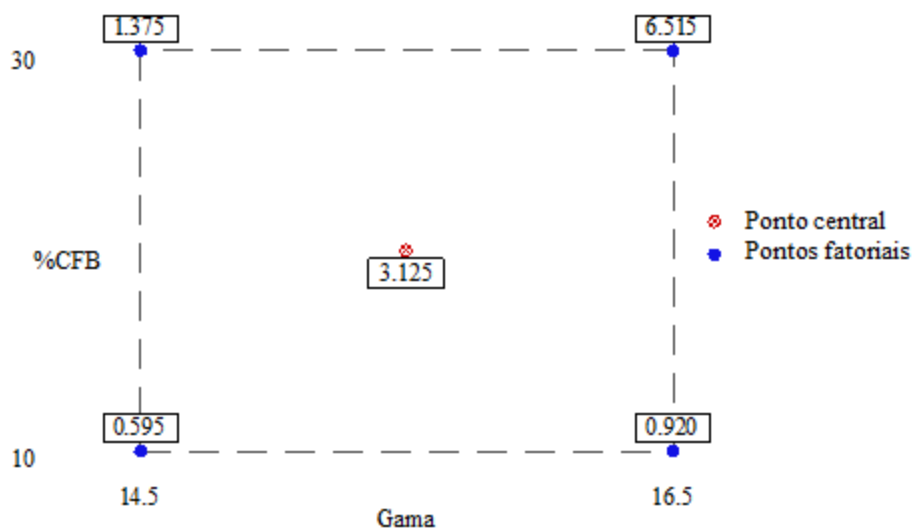
Os corpos de prova moldados com γd de 14,5 kN/m³ e teor de CFB em 10% apresentaram os menores valores de q_u , e os corpos de prova com γd de 16,5 kN/m³ e teor CFB em 30%, são os valores mais altos dentre os resultados. O ponto central (γd = 15,5 kN/m³ e teor de CFB= 20%) apresentou valores de q_u intermediários. Logo, a Figura 28 apresenta a média dos resultados de resistência das moldagens em duplicatas.

Tabela 13 - Resultados de q_u para os respectivos corpos de prova

Amostra	Dosagem		Moldagem	W sat (g)	q_u (MPa)
	γd (kN/m ³)	%CFB	γd (g/cm ³)		
1	14.5	10	1.47	357.24	0.54
2	14.5	10	1.46	358.45	0.65
3	16.5	10	1.64	383.95	0.75
4	16.5	10	1.65	375.55	1.09
5	14.5	30	1.45	353.74	1.36
6	14.5	30	1.45	359.25	1.39
7	16.5	30	1.64	387.72	6.43
8	16.5	30	1.63	389.16	6.60
9	15.5	20	1.55	370.57	3.23
10	15.5	20	1.55	370.99	3.02

Fonte: da autora (2020).

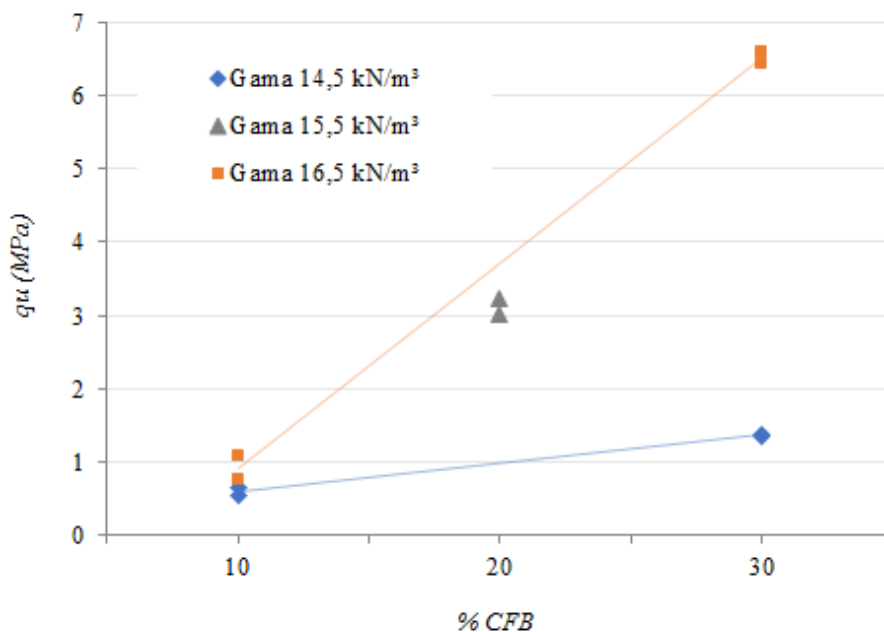
Figura 28 - Média das resistências (q_u) das moldagens em duplicatas



Fonte: da autora (2020).

A Figura 29 apresenta o gráfico de relação entre os resultados resistência à compressão simples (qu) e os teores de cinza da folha de bambu (CFB). Cada reta inclinada indica os níveis de teor de CFB (10 e 30%) para cada peso específico aparente seco (γ_d). Percebe-se que o aumento do teor de CFB exerce ganhos de resistência, visto que, para as amostras com γ_d de 16,5 kN/m³, o aumento da resistência foi relativamente maior quando comparadas as amostras de γ_d de 14,5 kN/m³. A amostra com γ_d de 15,5 kN/m³ e teor de CFB de 20% resultou em uma resistência intermediária.

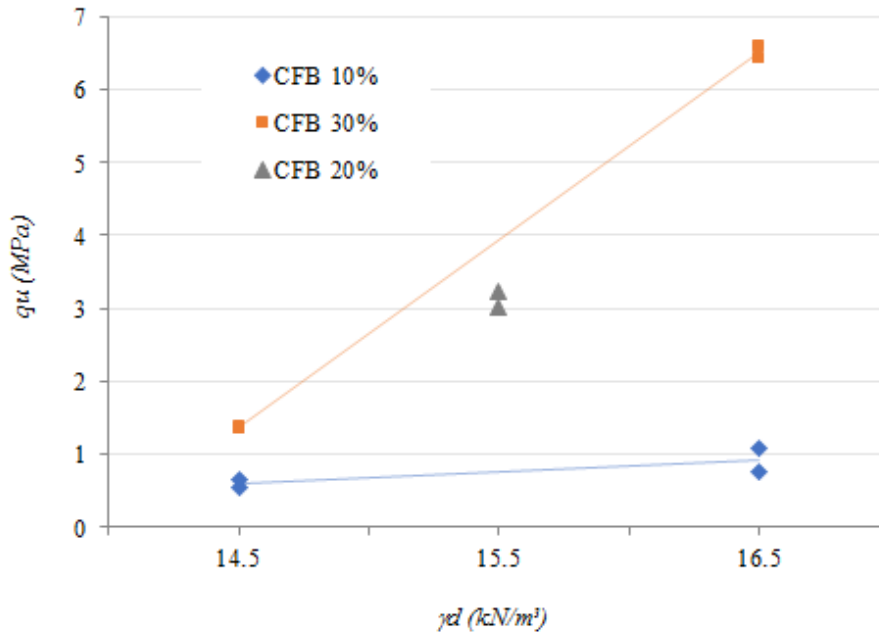
Figura 29 - Gráfico de relação qu x % CFB



Fonte: da autora (2020).

O gráfico de relação entre resistência à compressão simples (qu) e peso específico aparente seco (γ_d), na Figura 30, mostra que para as amostras com teor de CFB em 10%, a diferença no aumento da resistência entre os γ_d 14,5 kN/m³ e 16,5 kN/m³ foi em média de 0,325 MPa, e para as amostras com teor de CFB em 30%, o aumento da resistência entre os mesmos γ_d , foi em torno de 6,52 MPa. Verifica-se que com o aumento do γ_d , utilizando o teor de cinza em 30%, provoca um aumento significativo em qu .

Figura 30 - Gráfico de relação $q_u \times \gamma d$



Fonte: da autora (2020).

4.2 Módulo cisalhante inicial (G_0)

Os ensaios de ondas foram realizados com o instrumento PundiTLab, medindo os tempos de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento pelos corpos de prova cilíndricos, a fim de se obter uma estimativa do módulo cisalhante a pequenas deformações (G_0).

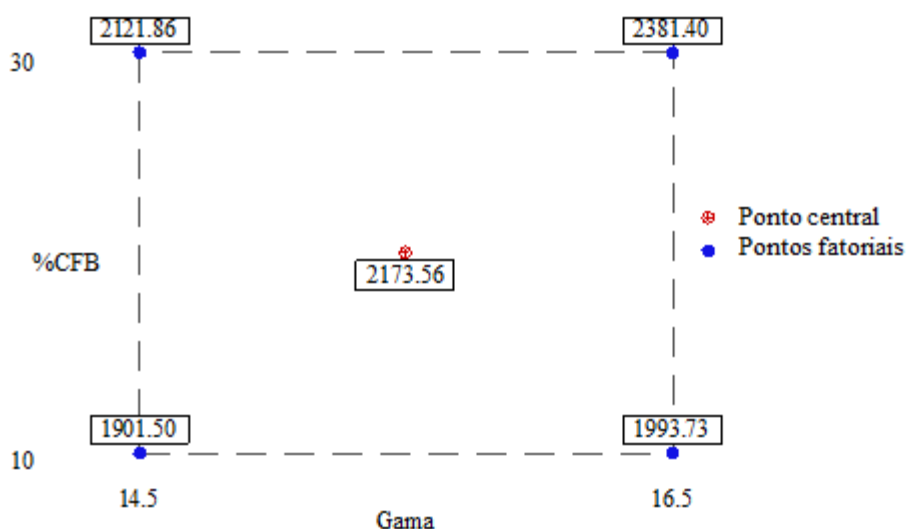
O procedimento ocorreu após o período de imersão dos corpos de prova. Inicialmente, leu-se o tempo do deslocamento da onda de compressão através do corpo de prova (t_p), e após o tempo de deslocamento da onda cisalhante (t_2). As velocidades (V_p e V_s) são determinadas pela relação entre a altura média de cada corpo de prova e o tempo aferido. Na Tabela 13 são apresentados os valores obtidos para o módulo cisalhante inicial (G_0) de cada amostra, a partir dos valores encontrados de t_2 e V_s . A Figura 31 apresenta a média dos resultados de G_0 das moldagens em duplicatas.

Tabela 13 - Resultados de G_0 para os respectivos corpos de prova

Amostra	γ_d (kN/m ³)	%CFB	t1 (μ s)	t2 (μ s)	Vs (m/s)	Wsat (g)	γ (g/cm ³)	G_0 (MPa)
1	14.5	10	49.97	99.80	1017.33	357.24	1.80	1858.74
2	14.5	10	51.33	97.70	1041.21	358.45	1.79	1944.26
3	16.5	10	43.50	99.80	1028.86	383.95	1.91	2019.00
4	16.5	10	56.30	99.80	1024.38	375.55	1.88	1968.47
5	14.5	30	61.20	93.40	1092.58	353.74	1.76	2106.20
6	14.5	30	59.67	93.40	1092.33	359.25	1.79	2137.52
7	16.5	30	44.40	93.40	1095.86	387.72	1.94	2323.96
8	16.5	30	40.90	91.30	1121.50	389.16	1.94	2438.83
9	15.5	20	46.90	93.40	1087.44	370.57	1.87	2206.90
10	15.5	20	47.33	94.90	1070.74	370.99	1.87	2140.23

Fonte: da autora (2020).

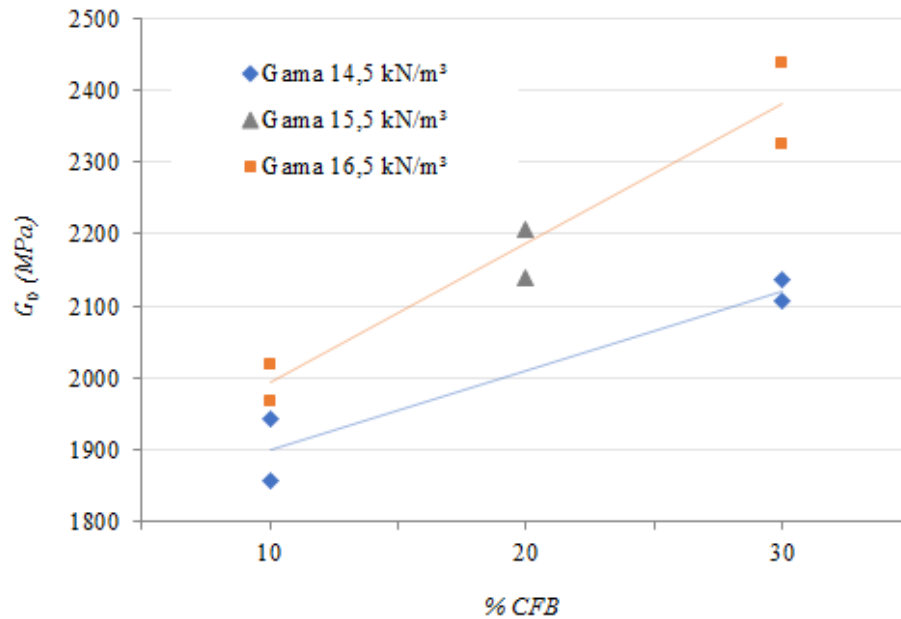
Figura 31 - Média dos módulos cisalhantes iniciais (G_0) das moldagens em duplicatas



Fonte: da autora (2020).

A Figura 32 mostra o gráfico de relação entre os resultados de módulo cisalhante inicial (G_0) e os teores de cinza da folha de bambu (CFB). Cada reta inclinada indica os níveis de CFB para cada peso específico aparente seco (γ_d). Percebe-se que o aumento do teor de CFB em cada γ_d exerce aumento no G_0 , observando que há pouca diferença no comportamento entre as amostras dos γ_d 14,5 kN/m³ e 16,5 kN/m³, ainda que o último gama possua um crescimento ligeiramente maior.

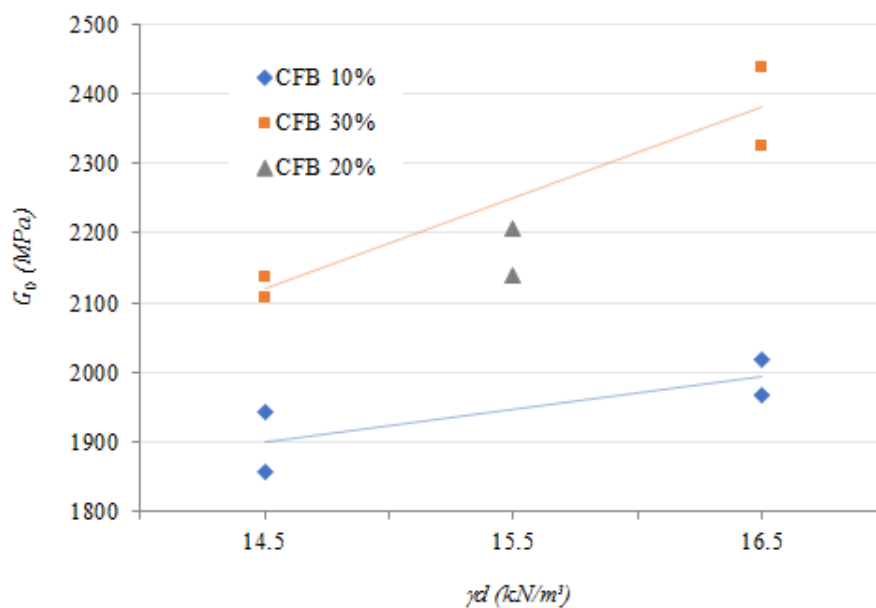
Figura 32 - Gráfico de relação $G_0 \times \%CFB$



Fonte: da autora (2020).

No gráfico de relação entre os resultados de módulo cisalhante inicial (G_0) e os pesos específicos aparente seco (γ_d), na Figura 33 as retas inclinadas indicam os níveis de γ_d para cada teor de cinza da folha de bambu (CFB). Analisa-se que o comportamento entre as amostras de 10% e 30% de cinza da folha de bambu é semelhante, porém, o último teor citado possui um maior aumento, se comparados.

Figura 33 - Gráfico de relação $G_0 \times \gamma_d$



Fonte: da autora (2020).

4.3 Análise estatística

Esta pesquisa tem por objetivo fundamental a análise da influência das variáveis controláveis durante o programa experimental (peso específico aparente seco - γ_d e teor de cinza da folha de bambu - CFB) e das interações na resistência das amostras. Sendo assim, realizou-se a análise de variância (ANOVA), a fim de determinar quais fatores exercem influência nas variáveis resposta: resistência à compressão simples (qu) e no módulo cisalhante inicial (G_0). Os parâmetros inseridos no processo e os intervalos pesquisados (fatores controláveis e os fatores constantes) são mostrados na Tabela 10, no item 3.3.1. A ANOVA foi executada a um nível de significância de 95%, o que indica que os fatores controláveis que apresentam valores de “p” menores do que 0,05 são estatisticamente significativos.

4.3.1 Análise de Variância para qu

A análise de variância para qu é apresentada na Tabela 14. Percebe-se que os valores de “p” o peso específico aparente seco (γ_d), teor de cinza da folha de bambu (CFB) e na relação entre ambos, são menores do que 0,05, considerando assim que os fatores descritos são significativos, ou seja, tem influência na variável resposta.

Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) para qu

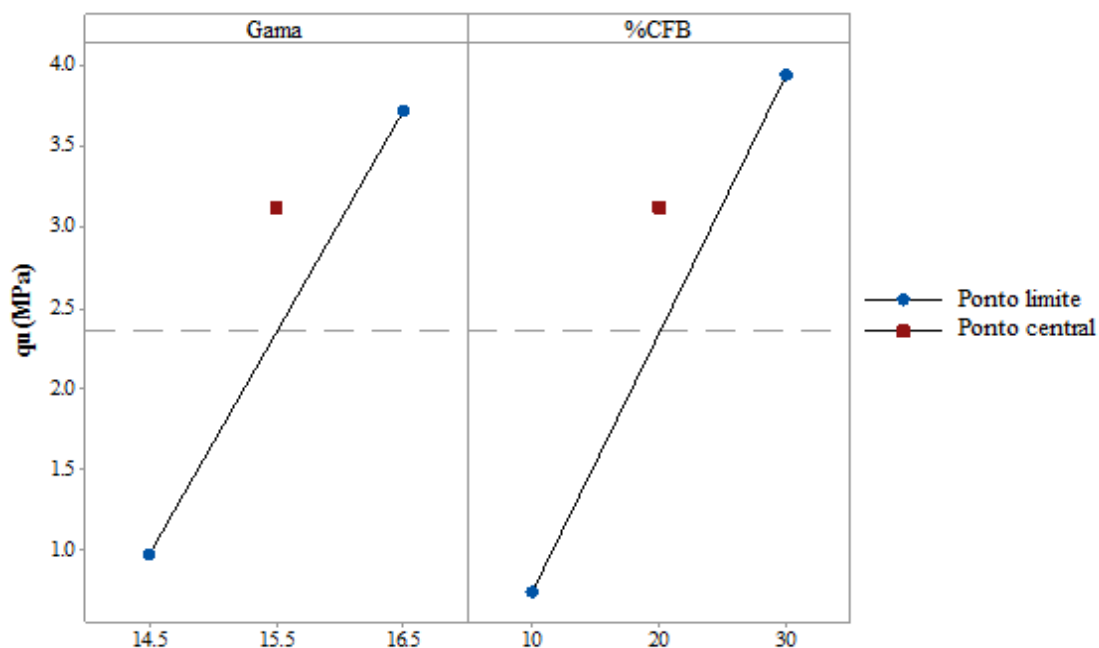
Fonte	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor-F	Valor-P	Significativo
γ_d (kN/m ³)	1	14.9331	740.73	0.000	SIM
% CFB	1	20.3203	1007.95	0.000	SIM
γ_d * %CFB	1	11.5921	575.01	0.000	SIM
Erro	5	0.0202			

Fonte: da autora (2020).

A Figura 34 apresenta o gráfico de efeitos principais relativos à resistência à compressão simples. Percebe-se que a linearidade entre as variáveis respostas e os fatores controláveis é corroborada pela tendência observada no ponto central. A medida que aumentam os valores de peso específico aparente seco (γ_d) e do teor da cinza da folha de bambu (CFB), aumenta a resistência dos corpos de prova.

O fator controlável que exerceu a maior influência sobre o aumento da resistência das misturas foi o teor de CFB, possivelmente pela formação de compostos ligantes (SCHEUERMANN FILHO, 2019). O segundo fator de maior influência foi o γd , verificando-se uma proporção linear entre a resistência e a compacidade das misturas em termos de peso específico aparente seco. Quanto maior o γd , maior é o intertravamento entre as partículas e a compacidade de cimentação proporcionada pelo aumento da área de contato entre as partículas que formam o sistema solo - cal - cinza da folha de bambu.

Figura 34 - Efeitos principais para q_u



Fonte: da autora (2020).

Os resultados de resistência à compressão simples correlacionados aos fatores controláveis, por meio de uma regressão linear executada no software Minitab 17, determinaram uma equação em função dos efeitos principais e com as interações entre esses, resultando assim na Equação 18, nas quais as letras correspondem ao seguintes fatores controláveis: peso específico aparente seco (A), teor de cinza da folha de bambu (B) e ponto central (PC).

$$q_u = 15,30 - 1,041A - 1,7064B + 0,12037AB + 0,774PC \quad (18)$$

A equação acima, que incorpora os efeitos de segunda ordem, apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,79%. Vale lembrar que só são incorporados nos modelos os fatores e/ou interações que desempenham maior influência na variável resposta.

4.3.2 Análise de Variância para G_0

A análise de variância para G_0 , na Tabela 15 mostra que os valores de “p” são menores do que 0,05 para o peso específico aparente seco (γ_d) e para o teor de cinza da folha de bambu (CFB), considerando significativa a influência dos fatores na variável resposta. Porém, na interação entre γ_d e teor de CFB, o valor de “p” resultou em 0,077, o que significa que não é possível comprovar sua influência na determinação do módulo cisalhante inicial.

Tabela 15 - Análise de variância (ANOVA) para G_0

Fonte	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor-F	Valor-P	Significativo
γ_d (kN/m ³)	1	61870	21.72	0.006	SIM
% CFB	1	184842	64.89	0.000	SIM
γ_d x %CFB	1	13996	4.91	0.077	NÃO
Erro	5	2849			

Fonte: da autora (2020).

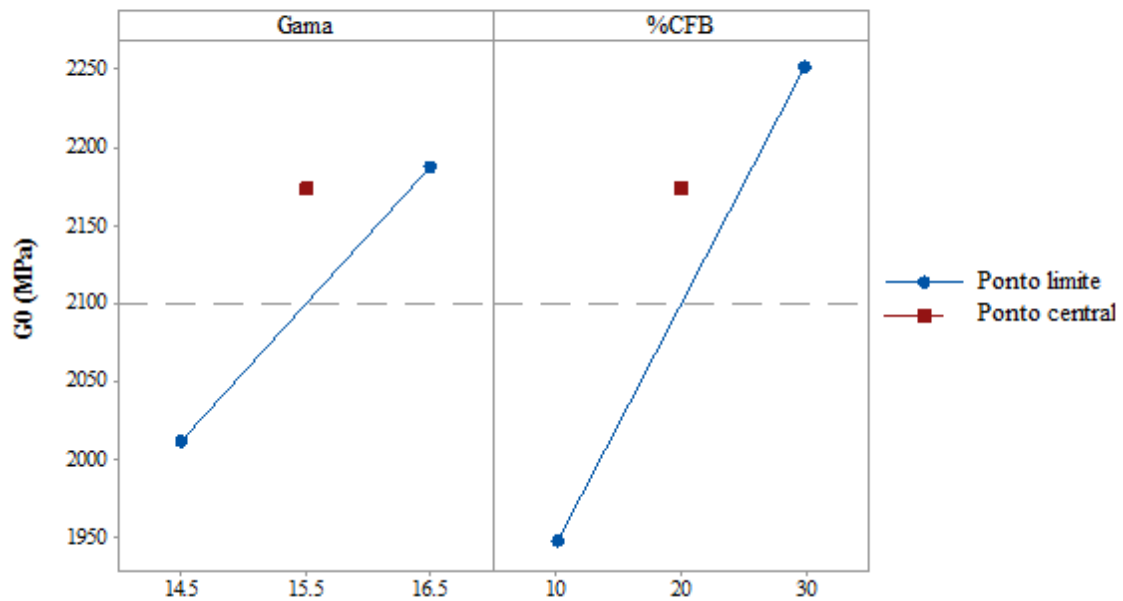
A Figura 35 apresenta o gráfico de efeitos principais relativos ao módulo cisalhante inicial. A linearidade entre as variáveis respostas e os fatores controláveis é confirmada pela tendência observada no ponto central, sendo que, medida que aumentam os valores de peso específico aparente seco (γ_d) e do teor da cinza da folha de bambu (CFB), aumenta o módulo cisalhante.

Em análise aos fatores descritos, a CFB foi o fator controlável que exerceu o maior efeito sobre a rigidez inicial das misturas. O aumento do teor de CFB contribuiu para o aumento do G_0 das amostras, podendo ser explicado pela formação de compostos ligantes. O γ_d é o segundo fator de maior influência sobre a rigidez inicial, visto que, se há maior compactidade, mais fácil é a propagação das ondas cisalhantes, o que implica maiores velocidades de onda transversal e maiores pesos específicos por amostra.

Também, determinou-se a equação em função dos efeitos principais e das interações, resultando assim na Equação 19, nas quais as letras correspondem aos seguintes fatores controláveis: peso específico aparente seco (A), teor de cinza da folha de bambu (B) e ponto central (PC). A equação, que incorpora os efeitos de segunda ordem, apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 90,05%.

$$G_0 = 433 + 87,9A + 15,20B + 73,9PC \quad (19)$$

Figura 35 - Efeitos principais para G_0



Fonte: da autora (2020).

4.4 Influência do índice η/B_{iv} nas variáveis respostas

Os resultados de resistência à compressão simples (qu) e do módulo cisalhante inicial (G_0) foram relacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}) na tentativa de se estabelecerem relações matemáticas entre este e as variáveis respostas, permitindo estimar o comportamento das diferentes características da moldagem (diferentes γ_d e % de CFB) em apenas uma curva e uma equação.

4.4.1 Influência do índice η/B_{iv} em relação a qu

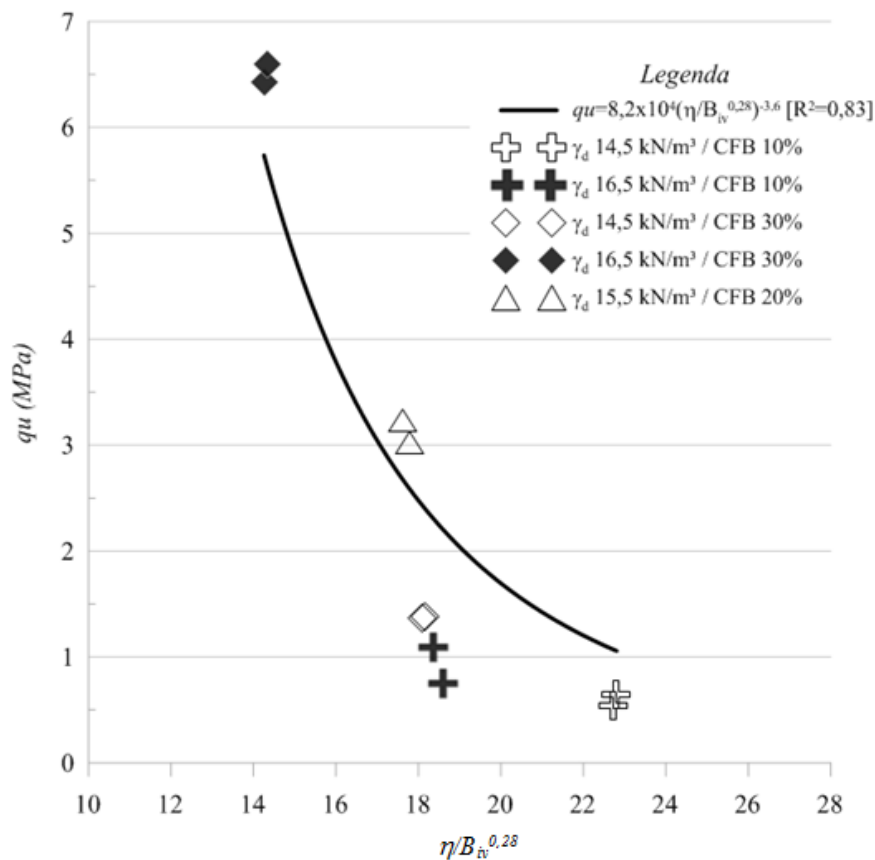
No processo, a resistência (qu) das amostras são plotadas em relação ao parâmetro η/B_{iv} , considerando a influência da cinza da folha de bambu (material pozolânico) e da cal de carbureto (ativador) da mistura, sendo este comportamento determinado pela Equação 20. Verifica-se que, ao ser ajustado pelo expoente 0,28, o parâmetro η/B_{iv} mostra-se apropriado para avaliar a relação em termos de resistência à compressão simples (qu).

$$qu (MPa) = 8,2 \times 10^4 (\eta/B_{iv}^{0,28})^{-3,6} [R^2 = 0,83] \quad (20)$$

O índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}), foi proposto por Consoli et al. (2018), em sua pesquisa, como um novo parâmetro, permitindo unificar a influência do material pozolânico (pó de vidro moído) e a cal de carbureto (aglutinante). Assim, todas as curvas adjacentes foram unificadas em uma única relação, como uma função da relação entre a porosidade da amostra e do ligante. Ainda, os autores utilizaram uma função de potência (0,28) para B_{iv} , a fim de compatibilizar essas variações que intervêm nos resultados dos parâmetros de resistência. Por isso, utilizou-se a mesma abordagem para a presente pesquisa, adotando-se $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ao considerar a soma dos teores volumétricos de CFB e cal de carbureto como o agente cimentante do solo.

Conforme mostra a pesquisa de Diambra et al. (2017), foi possível ajustar o coeficiente externo para o k e $1/k$, sendo $k=0,28$ e $1/k$, aproximadamente 3,6. Desta forma, a Figura 36 apresenta o gráfico de variação de qu com η/B_{iv} .

Figura 36 - Gráfico de variação $qu \times \eta/B_{iv}^{0,28}$



Fonte: da autora (2020).

Percebe-se que quanto menor o índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}), maior é a resistência (qu) alcançada. Em relação ao índice η/B_{iv} , neste caso, a porosidade (η) exerce maior influência à resistência (qu) do que o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}). Se ocorrer um aumento na porosidade, deve-se compensar com o aumento da energia de compactação (ou seja, aumento no γ_d) e caso não for suficiente devido algum imprevisto (por exemplo, equipamento e compactação de baixa energia), compensa-se com um aumento proporcionalmente maior de cinza da folha de bambu, ou de cal de carbureto, ou de ambos os materiais, mantendo assim um valor de resistência constante.

Para bases de pavimentos, é requerido um valor de resistência à compressão simples (qu) de no mínimo 2,1 MPa na utilização de solo-cimento, segundo a NBR 12253 (ABNT, 1992). Sendo assim, é visto que o máximo valor de η/B_{iv} , apresentado no gráfico da Figura

36, proporciona um nível de resistência de 6,60 MPa. Vale ressaltar que pode ser utilizada qualquer dosagem (γ_d , teor de CFB e cal de carbureto), desde que o valor de η/B_{iv} seja mantido dentro da faixa de valores estipulados.

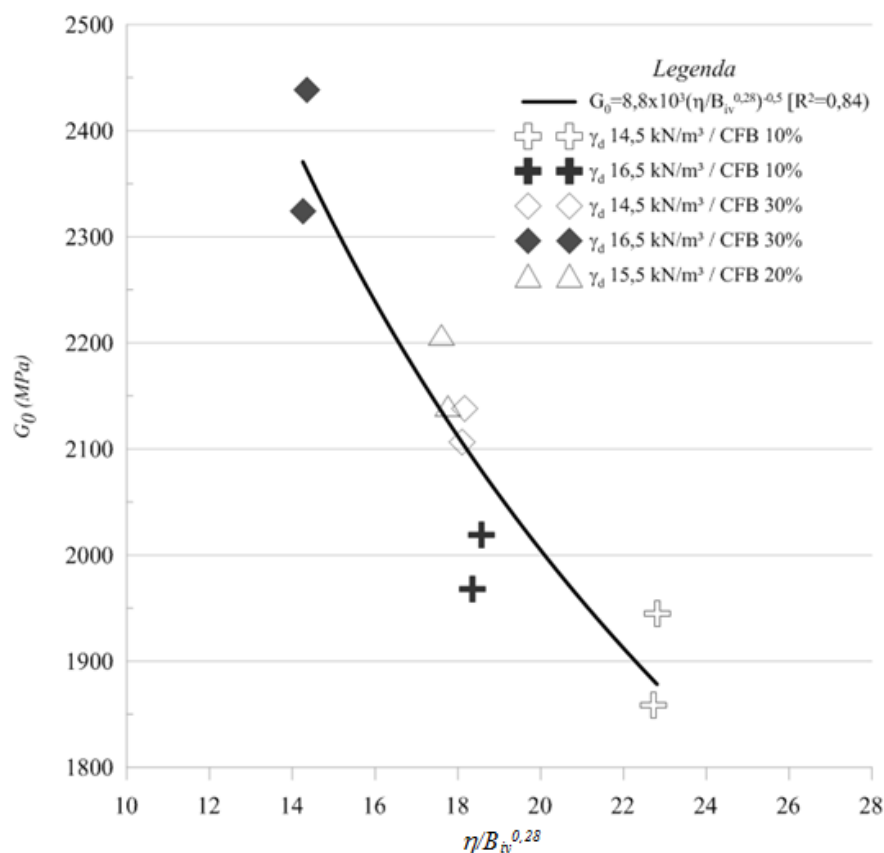
4.4.2 Influência do índice η/B_{iv} em relação a G_0

Os valores do módulo cisalhante (G_0) das amostras também foram plotados em relação ao parâmetro η/B_{iv} , considerando a influência da cinza da folha de bambu (material pozolânico) e da cal de carbureto (ativador) da mistura, sendo este comportamento validado pela Equação 21. Da mesma forma, seguiu-se o estudo proposto por Consoli et al. (2018), adotando-se o índice η/B_{iv} , ajustado ao expoente 0,28, ao considerar a soma dos teores volumétricos de CFB e cal de carbureto como o agente cimentante do solo, mostrando-se apropriado para avaliar a relação em termos de rigidez inicial.

Consideração o estudo de Diambra et al. (2017), para este caso, não foi possível ajustar o coeficiente externo para o k e 1/k, sendo k=0,28. A Figura 37 apresenta o gráfico de variação de G_0 com $\eta/B_{iv}^{0,28}$.

$$G_0 (MPa) = 8,8 \times 10^3 (\eta/B_{iv}^{0,28})^{-0,5} \quad [R^2 = 0,84] \quad (21)$$

Figura 37 - Gráfico de variação $G_0 \times \eta/B_{iv}^{0,28}$



Fonte: da autora (2020).

Segundo o gráfico, quanto menor o índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}), maior é a dureza inicial alcançada. A porosidade (η) exerce maior influência ao módulo cisalhante inicial (G_0), do que o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}), tanto que, em um suposto aumento na porosidade, deve-se compensar com o aumento da energia de compactação (ou γd), e no caso de não se mostrar eficiente ao ponto de manter o valor de dureza, compensa-se com um aumento proporcionalmente maior de cinza da folha de bambu, ou de cal de carbureto, ou de ambos os materiais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas informações expostas ao longo deste trabalho, apresentam-se as conclusões obtidas em análise aos resultados de caracterização e pozolanicidade da cinza da folha de bambu, bem como da resistência à compressão simples (qu) e do módulo cisalhante inicial (G_0) das amostras ensaiadas.

5.1 Conclusões

A padronização do procedimento de produção da cinza da folha de bambu, na queima controlada utilizando a temperatura à 500 °C, durante 3 horas, com abertura da mufla imediatamente após o término da queima, e no processo de moagem, com a quantidade específica de cinza e controle na sistematização do equipamento, mostrou-se adequada ao processo de obtenção da cinza da folha de bambu (CFB), promovendo resultados satisfatórios nas suas características.

Os ensaios caracterização da CFB, utilizando os métodos de área superficial específica (BET), fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX) e método de Chapelle modificado, indicaram resultados satisfatórios, de tal forma que se pode avaliar o potencial pozolânico do material, concluindo assim que a cinza possui um alto grau de amorficidade, comprovando sua eficiência reativa.

Em relação aos ensaios de resistência à compressão simples (qu) e ao módulo cisalhante inicial (G_0), entende-se que maiores quantidades de CFB e de γ_d proporcionam

melhores resistências e maior rigidez inicial, tal que, as amostras que possuem γ_d igual a 16,5 kN/m³ e teor de CFB de 30% apresentaram maiores valores de q_u e G_0 .

Quanto ao comportamento mecânico das misturas de teor de cinza da folha de bambu (CFB), em conjunto com a cal de carbureto (CC) e areia de Osório, percebe-se que com o aumento do teor de CFB, ocorre o aumento nos vínculos cimentantes entre os grãos de areia devido ao maior número de pontos de contato. Também, o aumento do peso específico aparente seco (γ_d) tem influência na redução do número de vazios, contribuindo assim para uma amostra mais compacta. Dado o exposto, o resultado obtido é no aumento na resistência e na rigidez das amostras ensaiadas.

Ao se julgar a influência das variáveis teor de cinza da folha de bambu (CFB) e peso específico aparente seco (γ_d), os resultados mostraram que ambas interferiram no comportamento mecânico do solo. No entanto, o teor de CFB mostrou ter maior influência nesse comportamento.

Quanto ao índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}) em relação a resistência (q_u) e ao módulo cisalhante inicial (G_0), percebe-se que a porosidade exerce maior influência nas variáveis respostas, sendo a influência do peso específico aparente seco (γ_d) das amostras o responsável pelo aumento de q_u e G_0 .

REFERÊNCIAS

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Soil Cement**: ACI 230.1R-09. Farmington Hills: ACI, 2009. 28 p.

ALIAS, N et al. **Thermogravimetric Analysis of Rice Husk and Coconut Pulp for Potential Biofuel Production by Flash Pyrolysis**. ICGSE, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohocken: ASTM, 2015. 6 p.

_____ **D1633**: Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders. West Conshohocken: ASTM, 2017b. 10 p.

_____ **D2487**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken: ASTM, 2017a. 10 p.

_____ **D2845**: Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. West Conshohocken: ASTM, 2008. 7 p.

_____ **D6276**: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. West Conshohocken: ASTM, 2019. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **BT-106**: Guia básico de utilização do cimento Portland. 7 ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a. 8 p.

_____ **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 10 p.

_____ **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c. 12 p.

_____**NBR 12024:** Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a. 6 p.

_____**NBR 12025:** Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b. 2 p.

_____**NBR 12253:** Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012c. 3 p.

_____**NBR 12653:** materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2015. 6 p.

_____**NBR 15895:** Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 6 p.

_____**NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a. 8 p.

_____**NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12 p.

_____**NBR 16840:** Solo — Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020a. 8 p.

_____**NBR 16843:** Solo — Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020b. 20 p.

BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MAHMUD, H. B.; MUNTOHAR A. S. Stabilization of residual soil with rice rusk ash and cement. **Construction and Building Materials**. Ed. 19, p. 448-453, 2005.

BAUER, R. J. B. **Falhas em revestimento**. Anais do Encontro Argamassas Industrializadas – Usos e Desempenho. São Paulo, 1993.

BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. 2007. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BELL, F. G.. **Methods of Treatment of Unstable Ground**. London: Newnes - Butterworth, 1975. 215 p.

BRITO, L. C. ; PARANHOS, H. da S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. p. 425-438, Setembro de 2017.

CAPUTO, H.P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica de solos e suas aplicações – Fundamentos**. Vol. 1, 7 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015.

CASTRO, C. E. N. de et. al. **Mechanical behavior of clay soil stabilized with glass residue powdered in high-energy and ball mills.** *Matéria (Rio J.)*. 2019, vol.24, n.2, e12356. Epub June 10, 2019. ISSN 1517-7076. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0671>.

CERATTI, J. A. P.; CASANOVA, F.J. Um método físico- químico para dosagem de solo-cimento . In : SIMPÓSIO SOBRE NOVOS CONCEITOS EM ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO EM GEOTECNIA, 1988 , Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro : COPPE/ABMS/ABGE, 1988, 2v. v.1, p.191-200.

CONSOLI, N. C. et. al. Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cement-Treated Soils. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 11, p.1126-1131, 2011a.

CONSOLI, N. C. et. al. Variables Controlling Strength of Artificially Cemented Sand: Influence of Curing Time. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 5, p.692-696, 2011b.

CONSOLI, N.C., DALLA ROSA, A., Saldanha, R.B. **Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures.** *J. Mater. Civ. Eng.* 23 (4), 432–440, 2011c.

CONSOLI, N. C. et. al. Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 144(9), 04018057, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001928](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001928)

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

COSTA, N; PEREIRA, Z. L. **Decision-Making in the Analysis of Unreplicated Factorial Designs.** *Quality Engineering*, v. 19, p. 215-225, 2007.

CRAIG, R. F.; KNAPPETT, J. A. **Craig Mecânica dos Solos.** 8 ed. [Reimpr.] Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2018.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga – Portugal, 2001.

CROFT, J. B. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. **Geotéchnique**, London, v.17, p.119-135, 1967.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **XXX/2019 - ES: Pavimentação – Solo-Cal – Adição de cal para Estabilização de camada de Sub-base – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro: DNIT, 2019. 9 p.

DIAMBRA, A. et al. Theoretical Derivation of Artificially Cemented Granular Soil Strength. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 5, p.1-9, 2017.

DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G.. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: Ich, 2017. 655 p.

EADES, J.L.; GRIM, R.E. **A quicktest to determine lime requirements for lime stabilization**. In: Highway Research Record, Washington, D.C., n. 139, p.61-72, 1966.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FRÍAS, M. et al. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. **Elsevier: Cement & Concrete Composites**. Amsterdã, p. 1019-1023. out. 2012.

GOULARTE, C. L.; PEDREIRA, C. L. da S. **Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento**. 2009. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/geors2009/2009- goularte-pedreira.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2019.

GUARNETTI, R. L.. **Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: aspectos técnicos econômicos e ambientais**. 2013. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Energia, Escola Politécnica - Faculdade de Economia e Administração - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2a ed. São Paulo: PINI, 2002.

IMPE, W. F. V. **Soil Improvement Techniques and Their Evolution**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. 131 p.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Sydney: Butterworths, 1972. 374 p.

KÉZDI, A. **Stabilized earth roads**. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1979. 327 p.

KOHLRAUCHS, D. N. **Estabilização de areia fina com bentonita, vidro moído e agente cimentante (cal de carbureto ou cimento)**. 2018. 180 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LADD, R. "Preparing test specimens using undercompaction." **Geotechnical Testing Journal**, 1(1), p. 16-23, 1978.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 553 p.

LANA, S. C. **Avaliação da atividade pozolânica do resíduo de corte de ardósia**. 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

LEON, H. B. **O índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/Civ) como um parâmetro de estado para areias cimentadas.** 2018. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,, Porto Alegre, 2018.

LEON, Helena Batista; CARRETTA, Mariana da Silva; AZEVEDO, Maurício Birkan; CONTI, Matteo; CONSOLI, Nilo Cesar. Statistical Analysis of the Influence of Curing Time and Temperature on Compressive Strength of Sandy Soil Stabilized with Sustainable Binder. **Journal Of Testing And Evaluation**, [s.l.], v. 48, n. 3, p. 20180763, 26 dez. 2019. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/jte20180763>.

MASSAZZA, F., “Pozzolana and pozzolanic cements.” in **Lea’s chemistry of cement and concrete** (London: Arnold, 1998), 471-635.
<https://doi.org/10.1016/b978-075066256-7/50022-9>

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. (Org.). **Lea’s Chemistry of Cement and Concrete**. 4 ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2004, p. 471 – 602.

MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

MEHTA, K. **Natural Pozzolans**. Supplementary Cementing Materials for Concrete, CANMET-SP-86-8e, Canadian Government Publishing Center, Supply and Services, Ottawa. 1987, V1, p. 1-33.

MENDES, R. R. A. **Estudo da Minimização do Custo de Usinagem de Aço Duro Usando a Metodologia de Superfície de Resposta**. Itajubá (MG): 2006. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá, 2006.

MINNICK, L. J. **Reactions of hydrated lime with pulverized coal fly ash**. In: FLY ASH UTILIZATION, 1967, Pittsburgh. Proceedings... Edison Electric Institute, American public Power Association, Bureau of Mines Symposium. 1967, p.287-315.

MITCHELL, J. Soil improvement - state of the art report. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1981, Stockholm. **Proceedings...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1981. v. 4, p. 509 - 565.

MOH, Z.C. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. **Highway Research Record**, Washington, v.86, p.39-61, 1965.

MONTGOMERY, D.C. **Desing and analysis of Experiments**. 7 Ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MORAES, M. J. B. de. **Estudo do potencial da cinza de folha de bambu para sua utilização como material pozolânico e sustentável em matrizes cimentantes**. 2019. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

MOREIRA, A. C. de O. **Caracterização de *Bambusa vulgaris* Schard. ex J.C. Wendl. var. *vulgaris*, e dos resíduos de caldeira no processo de conversão térmica de energia.** 2012. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OTOKO, G. R. A review of the stabilization of problematic soils. **International Journal of Engineering and Technology Research**, Vol. 2, No. 5, May 2014, p. 1 – 6.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRIETTO, P. D. M. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado.** 1996. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

QUARCIONI, V. A. et al. Métodos de ensaio indiretos e método Chapelle direto para determinação do consumo de cal pelos materiais pozolânicos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, p. 1-7, fev. 2015. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/5c1b/19c6aa5820839e4f3e6c93dabff998123c5c.pdf?_ga=2.228398173.1956435930.1587091462-676618381.1587091462. Acesso em: 17 abr. 2020.

RAISDORFER, J. W.. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland : efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos.** 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RIBEIRO, J, L, D. ; CATEN, C.S. **Projeto de Experimentos.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Apostila do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2014.

SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada.** 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,, Porto Alegre, 2014.

SALDANHA, R. B., and CONSOLI, N. C., “Accelerated mix design of lime stabilized materials.” **Journal of Materials in Civil Engineering** 28, no. 3 (March 2016): 06015012 1-8, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001437](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001437).

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação:** v. 2. São Paulo: Pini, 2001. 672 p.

SILVA, Cláudia C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. 2007. 170 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto**. 2019. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SCURLOCK, J.M.O; DAYTON D.C.; HAMES B. **Bamboo: an overlooked biomass resource?**. Biomass and Bioenergy, Kidlington, v. 19 p. 229-244, 2000.

SZELIGA, L. **Estudo experimental de um solo arenoso estabilizado com cinzas de resíduo sólido urbano e cal**. 2014. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

TASHIMA, M. M. **Cinza de Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Unesp, Ilha Solteira, 2006.

TOMAZELLI, L. J.; WILLWOCK, J. A. O Cenozóico Costeiro do Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; HOS, L. F. de. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS/CIGO, 2000. p. 375-406.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais**. 1994. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction**. Washington: TRB, 1987. 58p. (State of the art report, 5).

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. Flexible pavement design for airfields. **USACE Technical Manual No. TM5-822-13**, (1994).

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do Comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 224 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, A. P. **Estudo de aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Paraíba, 2005.

VILLAR-COCIÑA, E.; MORALES, E. V.; SANTOS, S.V.; SAVASTANO JR., H.; FRÍAS, M. **Pozzolanitic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters**. Cement & Concrete Composites, Kidlington, v. 33, p. 69-73, 2010.

VILLAR-COCIÑA, E.; SAVASTANO JR., H.; RODIER, L.; LEFRAN, M.; FRÍAS, M.
Pozzolanic Characterization of Cuban Bamboo Leaf Ash: Calcining Temperature and Kinetic Parameters. Waste Biomass Valorization, Dordrecht, v. 9, p. 691-699, 2016.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09